



SKRIPSI - TK 141581

***SIMULASI NUMERIK DEPOSISI CHARGED AEROSOL
PARTICLE PADA POROUS STRUCTURE***

I Gede Wahyudi Mahendra Putra
NRP 2311100 002
Rosmalia Andini
NRP 2311100 154

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M. Eng
NIP. 195209161980031002
Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng
NIP. 197612292009121001

JURUSAN TEKNIK KIMIA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2015



SKRIPSI - TK 141581

***SIMULASI NUMERIK DEPOSISI CHARGED AEROSOL
PARTICLE PADA POROUS STRUCTURE***

I Gede Wahyudi Mahendra Putra
NRP 2311100 002
Rosmalia Andini
NRP 2311100 154

Dosen Pembimbing

Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M. Eng
NIP. 195209161980031002
Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng
NIP. 197612292009121001

JURUSAN TEKNIK KIMIA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2015



FINAL PROJECT - TK 141581

NUMERICAL SIMULATION OF CHARGED AEROSOL PARTICLE DEPOSITION INTO POROUS STRUCTURE

I Gede Wahyudi Mahendra Putra
NRP 2311100 002
Rosmalia Andini
NRP 2311100 154

Supervisors

Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M. Eng
NIP. 195209161980031002
Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng
NIP. 197612292009121001

CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2015

LEMBAR PENGESAHAN

SIMULASI NUMERIK DEPOSISI CHARGED AEROSOL PARTICLE PADA POROUS STRUCTURE

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Teknik Program Studi S-1
Jurusan Teknik Kimia
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**I GEDE WAHYUDI MAHENDRA P.
ROSMALIA ANDINI**

**2311100002
2311100154**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng
(Pembimbing I)
2. Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng
(Pembimbing II)
3. Prof. Dr. Ir. Mahfud, DEA
(Penguji I)
4. Dr. Tantular Nurtono, S.T., M.Eng
(Penguji II)
5. Dr. Widiyastuti, S.T., M.T
(Penguji III)



**SURABAYA
JULI 2015**

SIMULASI NUMERIK DEPOSISI *CHARGED AEROSOL PARTICLE* PADA *POROUS STRUCTURE*

Nama Mahasiswa : I Gede Wahyudi M.P. (2311100002)
Rosmalia Andini (2311100154)
Jurusan : Teknik Kimia FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng
Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kondisi yang optimum pada deposisi *charged aerosol particle* pada *porous structure* berdasarkan simulasi numerik dengan *software Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan FLUENT dan UDF (*User Defined Function*). Dimensi yang akan digunakan pada CFD ini adalah dengan permodelan 2 dimensi, dimana *wall* memiliki panjang 10 cm dan lebar 2,5 cm. *Cone jet* digunakan sebagai *inlet* dari partikel dan *porous structure* sebagai substrat. Analisa yang dilakukan meliputi pola gerakan partikel, kecepatan gerakan partikel, dan jumlah partikel pada *porous structure*. Variabel yang ditetapkan pada permodelan ini adalah jarak partikel dengan substrat dan diameter *pore* dari substrat. Sedangkan ukuran partikel, kecepatan fluida, dan muatan pada partikel divariasikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin kecil partikel yang digunakan maka semakin optimum deposisi yang terjadi. Deposisi yang optimum juga terjadi jika aliran fluidanya dalam kondisi memiliki N_{Re} sebesar 7.500. Pada saat partikel diberikan muatan, deposisi yang optimum terjadi ketika partikel diberikan muatan sebesar $3,8 \times 10^{-14}$ C dengan aliran fluida memiliki N_{Re} 1.500, dan ukuran partikel 76 nm

Kata kunci : *Charged particle, Porous Structure, Deposisi, CFD.*

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

NUMERICAL SIMULATION OF CHARGED AEROSOL PARTICLE DEPOSITION INTO POROUS STRUCTURE

Name of Student : I Gede Wahyudi M.P (2311100002)
Rosmalia Andini (2311100154)
Department : Chemical Engineering FTI-ITS
Advisor : Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng
Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng

ABSTRACT

This research was committed to study deposition process of charged aerosol particle into porous structure based on CFD numerical simulation using FLUENT and UDF (User Defined Function). CFD modelling used in this research was 2 dimension, which had 10 cm length and 2,5 cm width as wall. Cone jet was used as inlet of the particles and porous structure as a substrate. This study through electric on particle, particle trajectory, particle distribution, flow velocity, and number of particles in the porous structure. The variables adjusted were the distance between particle and substrate, and the pore diameter of substrate. While the manipulated variables were diameter of particle, number of pore, velocity of fluid, and charges of particle. The result showed that the smaller particle size, the optimum deposition occurred. The optimum deposition also occurred when the fluid had N_{Re} 7.500. When the particles were given a charge, the optimum deposition when the particle charge was $3,8 \times 10^{-14}$ C, with the N_{Re} of fluid was 1.500, and particle size was 76nm

Keywords: *Charged particle, Porous structure, Deposition, CFD.*

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah SWT. yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan laporan Skripsi kami yang berjudul:

” Simulasi Numerik Deposisi *Charged Aerosol Particle* pada *Porous Structure*”

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi program S-1 di Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Penulis menyadari dalam penyusunan Skripsi ini tidak akan selesai tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini kami ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua serta saudara-saudara kami yang selalu memberikan kasih sayang tulus, motivasi, bimbingan, dan doa yang selalu tercurah selama ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng selaku Dosen Pembimbing dan Kepala Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran, Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS, atas bimbingan, saran, dan motivasi yang diberikan.
3. Bapak Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng. selaku Dosen Pembimbing, atas bimbingan, saran, dan motivasi yang diberikan.
4. Bapak dan Ibu Dosen serta Karyawan Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran Jurusan Teknik Kimia FTI – ITS Surabaya yang telah memberikan ilmu dan bimbingan kepada penulis.
5. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Kimia FTI – ITS Surabaya yang telah memberikan ilmu serta bimbingannya selama kami kuliah.
6. Bapak Setiyo Gunawan, S.T., Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Jurusan Teknik Kimia FTI – ITS Surabaya.

7. Yusi, Icha, Ardianto, Gin Gin Rika, Faning, Rosi, Stephen, Azis, Hermawan, Laila, Ni'am, Juwi, Drajat, Dimas, Della, Wulan, Rina, Diana, Lia, Upik, Sarah, Lemon, Audit, Ridho dan Raga sebagai rekan-rekan seperjuangan di Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran atas semangat dan motivasinya.
8. Seluruh civitas akademika Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS yang telah memberikan dukungan moril kepada penulis.
9. Keluarga besar Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), khususnya teman-teman di Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS atas semua dukungan, semangat, serta kerjasamanya.
10. Serta semua pihak lainnya yang tidak bisa disebutkan penulis satu persatu yang telah membantu penulis selama penulisan laporan

Penulis menyadari laporan skripsi ini tidak luput dari berbagai kekurangan, untuk itu penulis mengharapkan saran dan kritik demi kesempurnaan dan perbaikannya. Semoga skripsi ini dapat berguna di kemudian hari.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK (INDONESIA)	i
ABSTRAK (ENGLISH)	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Perumusan Masalah	3
I.3 Batasan Masalah.....	3
I.4 Tujuan Penelitian	3
I.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 Deposisi Partikel	5
II.1.1 Deposisi Fase <i>Liquid</i>	5
II.1.2 Deposisi Fase Gas	6
II.2 <i>Porous Structure</i>	7
II.3 <i>Charged Particle</i>	8
II.4 <i>Particle Tracking</i>	8
II.4.1 <i>Eulerian Particle Tracking</i>	9
II.4.2 <i>Langrangin Particle Tracking</i>	9
II.5 Metodologi <i>Particle Tracking</i> pada CFD.....	11
II.5.1 <i>Discrete Phase</i>	11
II.6 Model Deposisi Partikel	12
II.6.1 <i>Particle Sticking</i>	15
II.7 CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>).....	16
II.7.1 Persamaan Transport Senyawa.....	18
II.7.2 Permodelan untuk Turbulensi	18
II.7.3 <i>Discrete Phase Model</i>	20
II.7.4 <i>Stochastic Tracking</i>	20
II.7.5 Kondisi Batas Untuk <i>Wall</i>	20

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
III.1 Sistem yang Dipelajari	23
III.2 Kondisi Batas	24
III.3 Prosedur Penelitian untuk Permodelan	24
III.4 Variabel Penelitian	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
IV.1 Proses Deposisi dan Pemilihan Model pada CFD	29
IV.2 Validasi Hasil Eksperimen dengan Simulasi.....	30
IV.3 Ukuran Partikel Optimum pada Deposisi Partikel	31
IV.4 Kondisi <i>Carrier Phase</i> Fluida Optimum pada Deposisi Partikel.....	37
IV.5 Pengaruh Jumlah <i>Pore</i> terhadap Deposisi Partikel	43
IV.6 Pengaruh <i>Electric Force</i> pada Deposisi Partikel	45
IV.7 Pengaruh Ukuran <i>Charged</i> Partikel pada Deposisi Partikel	53
IV.8 Pengaruh N_{Re} Fluida pada Deposisi <i>Charged</i> <i>Particle</i>	56
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
V.1 Kesimpulan.....	59
V.2 Saran.....	59
DAFTAR NOTASI	xiii
DAFTAR PUSTAKA	xv
APPENDIKS.....	A-1
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel IV.1	<i>Charged Density</i> pada Tiap Ukuran Partikel... 54
-------------------	--

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1	Ilustrasi Pembentukan AAO.....	8
Gambar II.2	Ilustrasi Gerak <i>Charged Particle</i>	14
Gambar II.3	Gaya yang Terjadi pada Adhesi Partikel pada Permukaan	15
Gambar II.4	Kondisi Batas untuk Permodelan <i>Wall</i>	21
Gambar III.1	Dimensi Simulasi <i>Charged Particle Deposition</i>	23
Gambar III.2	Flowchart Simulasi pada Simulasi Deposisi <i>Charged Particle</i>	26
Gambar IV.1	Grafik Validasi Hasil Eksperimen dan Simulasi	31
Gambar IV.2	Pengaruh Diameter Partikel pada Range N_{Re} 500-3500.....	32
Gambar IV.3	Pengaruh Diameter Partikel pada Range N_{Re} 7500-30000.....	33
Gambar IV.4	Gerak Partikel untuk Ukuran Partikel 7.6×10^{-5} mm.....	34
Gambar IV.5	Gerak Partikel untuk Ukuran Partikel 3.0×10^{-5} mm.....	36
Gambar IV.6	Vektor Fluida untuk Ukuran Partikel 7.6×10^{-5} mm.....	40
Gambar IV.7	Vektor Fluida pada N_{Re} 1500.....	41
Gambar IV.8	Vektor Fluida pada N_{Re} 7500.....	42
Gambar IV.9	Pengaruh Jumlah <i>Pore</i> Terhadap Jumlah Partikel Terdeposisi	43
Gambar IV.10	Gerak Partikel pada Jumlah <i>Pore</i> Berbeda	44
Gambar IV.11	Hasil Simulasi dengan COMSOL Mengenai <i>Electric Field Strength</i> pada Setiap Titik di Satu <i>Pore</i>	46
Gambar IV.12	Nilai <i>Electric Field</i> pada Tiap Titik Hasil Simulasi COMSOL.....	47
Gambar IV.13	Vektor Fluida dengan Adanya Outflow dan Partikel Tanpa Muatan.....	48

Gambar IV.14 Gerak Partikel dengan Adanya Outflow dan Partikel Tanpa Muatan.....	49
Gambar IV.15 Pengaruh Muatan pada Partikel Terhadap Jumlah Partikel Terdeposisi	50
Gambar IV.16 Gerak Partikel untuk Beda Muatan Partikel	51
Gambar IV.17 Gerak Partikel di <i>Pore</i> untuk Muatan Partikel Sebesar 3.8×10^{-16} C	52
Gambar IV.18 Gerak Partikel di <i>Pore</i> untuk Muatan Partikel Sebesar 3.8×10^{-14} C	52
Gambar IV.19 Pengaruh Ukuran <i>Charged</i> Partikel pada Deposisi Partikel	53
Gambar IV.20 Gerak Partikel untuk Beda Ukuran Partikel.....	56
Gambar IV.21 Pengaruh Aliran Fluida pada Deposisi Partikel	56
Gambar IV.22 Vektor Fluida pada <i>Chamber</i> untuk setiap N_{Re}	58

DAFTAR NOTASI

NOTASI	KETERANGAN	SATUAN
C_d	<i>Coefficient Drag</i>	[...]
d_p	<i>Particle diameter</i>	m
F_D	<i>Drag force on particle</i>	N
k	<i>Energy kinetic turbulent</i>	m^2/s^2
m_p	<i>Mass of particle</i>	kg
Re_p	<i>Reynolds number of the particle</i>	[...]
S	<i>Ratio of particle density to fluid density</i>	[...]
t	<i>Time</i>	s
T	<i>Gas temperature</i>	K
T_p	<i>Particle temperature</i>	K
u	<i>Fluid velocity</i>	m/s
u_j	<i>Instantaneous fluid velocity</i>	m/s
u_p	<i>Particle velocity</i>	m/s
u_{tc}	<i>Critical wall shear velocity</i>	m/s
v_{cr}	<i>Capture velocity</i>	m/s
v_n	<i>Normal velocity</i>	m/s
ε	<i>Turbulent dissipation rate</i>	m^2/s^3
μ	<i>Dynamic viscosity of fluid</i>	Kg/m.s
ν	<i>Kinematic viscosity</i>	M2/s
ν_p	<i>Poisson ratio of particle material</i>	[...]
ν_s	<i>Poisson ratio of surfaces material</i>	[...]
ω	<i>Specific dissipation rate</i>	s^{-1}
ρ	<i>Density of fluid</i>	Kg/m3
ρ_p	<i>Density of particle</i>	Kg/m3

τ_{12}	<i>Particle relaxation time</i>	s
τ_w	<i>Wall shear stress</i>	Pa
A	luas permukaan	m ²
\vec{F}	Additional acceleration term	Force/unit particle mass
g	Konstanta gravitasi	m/s ²
n	Jumah Droplet dalam 1 cell	[...]
P	Pressure	Pa
Pr	Prandtl number	[...]
Re	Reynold Number	[...]
S_k	User defined source Term	[...]
ε	dissipation rate dari energi kinetik turbulen	m ² /s ³
ε_p	emisivitas partikel	[...]
σ	konstanta Stefan-Boltzmann (5,67 x 10 ⁻⁸)	W/m ² -K ⁴
η	Effectiveness factor	[...]
θ_R	Temperatur radiasi	K
δ_{ij}	Kronecker delta	[...]

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Dewasa ini, perkembangan teknologi dalam bidang *porous structure material* semakin berkembang. Penggunaan *porous structure* ini sudah banyak diaplikasikan pada berbagai bidang seperti sebagai *support* katalis (Matsumoto et al., 2000), membrane filter (Kyotani et al., 2002), dan pembuatan nanomaterial (Bogart et al., 2005). *Porous structure* ini banyak digunakan dikarenakan memiliki struktur yang unik seperti *high specific surface area*, dan dapat meningkatkan daya tahan dari struktur tersebut. Selain itu, efisiensi deposisi partikel di dalam *porous structure* terhadap *particle detachment* juga tinggi meskipun diberikan gaya dari luar (Kusdianto et al., 2014). Salah satu metode pembentukan *porous structure* adalah dengan *electrochemical anodization*. *Electrochemical anodization* pada substrat aluminium banyak digunakan untuk membentuk *porous structure* karena metode dan proses yang mudah, ukuran dan diameter *pore* dapat dikontrol dengan memvariasikan jenis elektrolit, *applied voltage*, dan waktu anodisasi. *Sehingga porous structure* dapat memberikan ruang untuk suatu partikel dapat terdeposisi pada strukturnya (Kusdianto, 2014). Deposisi partikel pada *porous structure* juga akan memberikan manfaat pada aplikasi fotokatalitik (Ishikawa et al., 2001) karena kemungkinan suatu partikel lepas dari porous structure lebih sedikit daripada partikel yang terdeposisi pada flat surface. (Losic et al., 2008)

Beberapa metode untuk mendeposisikan partikel di dalam *porous structure* dapat dilakukan menggunakan deposisi fase *liquid* atau fase gas. Contoh dari metode deposisi fase *liquid* adalah *electrodeposition* (Ishikawa et al., 2001), *dip coating* (Cervantez et al., 2009), *electrophoretic* (Kamada et al., 2005), dan *electrophoretic deposition* dengan menggunakan *pulsed* dan *constant DC* (Kusdianto et al., 2014). Sedangkan contoh dari metode deposisi fase gas adalah *chemical vapor deposition*

(Cervantez et al., 2009), *sputtering* (Wang et al., 2007), *atomic layer deposition* (Zhang et al., 2013), *pulse layer deposition* (Pereira et al., 2007), dan *plasma deposition* (Losic et al., 2008).

Metode deposisi dengan fasa gas adalah salah satu metode deposisi yang dapat meningkatkan struktur, *physical* dan *properties* dari substrate *anodized aluminium oxide* (AAO) dengan mendeposisikan suatu material ke porous *structure* AAO. Seperti contoh AAO yang diberi lapisan dari Au, Pd, Pt, dan Ti yang dilaporkan mampu meningkatkan *properties* AAO sebagai katalis.

Namun metode deposisi fase gas pada studi sebelumnya menjelaskan bahwa metode ini berasal dari *gas-to-solid state (thin film)* yang memerlukan suatu reaksi untuk mendeposisikan suatu partikel, sehingga kurang representatif bila digunakan sebagai *particle-to-particle route* yang tidak memerlukan terjadinya suatu reaksi. Maka dilakukanlah penelitian oleh Kusdianto (2014) mengenai deposisi *pre-synthesized particle* ke *porous structure*, untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada deposisi fasa gas dengan *particle-to particle route* agar dapat digunakan untuk partikel apapun tanpa tergantung dari suatu hal. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa partikel berhasil terdeposisi pada *porous structure* (Kusdianto, 2014).

Simulasi numerik (COMSOL Multiphysics ver 4.3, Stockholm) adalah salah satu yang digunakan untuk mensimulasikan deposisi partikel, studi mengenai deposisi ini dengan memperhatikan *electric field* pada *porous structure* dengan menggunakan model *single pore*. *Charged particle* diasumsikan mengikuti gerak elektrik berdasarkan gaya Coulomb. Dari hasil simulasi yang dilakukan, menunjukkan bahwa partikel dapat masuk kedalam *pores* ketika dinding substrat dilapisi oleh *conductive material* (Kusdianto et al., 2014). Namun simulasi yang dilakukan ini belum mensimulasikan gerakan partikel ke *porous structure*, karena hanya mensimulasikan garis gerak elektrik dari partikel.

Simulasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD) adalah salah satu alternatif yang mungkin dapat digunakan untuk

mensimulasikan gerak partikel pada *porous structure*. Simulasi numerik seperti CFD dapat digunakan untuk mensimulasikan gerak partikel (Versteeg et al., 1995). CFD merupakan *software* yang mendukung untuk mengamati pola alir yang kompleks dalam bentuk visual mengenai pergerakan partikel, memprediksi kemungkinan lintasan yang tidak stabil, memprediksi karakteristik Bergeraknya partikel yang dipengaruhi muatan listrik, dan mampu mengukur dan membandingkan pergerakan partikel dengan parameter kontrol yang mampu diatur dan diubah-ubah, seperti perbedaan muatan antar partikel, jumlah partikel, ukuran partikel, dan sebagainya.

I.2 Rumusan Masalah

Dari uraian diatas, dapat disimpulkan bahwa belum ada penelitian sebelumnya secara simulasi mengenai deposisi *charged particle* di dalam *porous structure*, sehingga dilakukan penelitian berbasis simulasi dengan menggunakan suatu *software*.

I.3 Batasan Masalah

Pada Penelitian ini batasan-batasan penelitian yang digunakan adalah :

1. Deposisi *charged particle* pada fasa gas ke *porous structure*.
2. Jarak partikel dengan *substrate*, muatan listrik pada partikel dan *substrate*, ukuran partikel, dan kondisi fluida pembawa dan jumlah *pore* pada *porous structure*.
3. Pola gerakan partikel yang terjadi di dalam media fasa gas menuju *porous structure*.

I.4 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kondisi yang optimum pada proses deposisi dari *charged particle* pada *porous structure* berdasarkan simulasi dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan FLUENT dan *User defined Function* (UDF). UDF digunakan untuk persamaan yang tidak

tersedia di CFD seperti persamaan untuk potensial dan arus listrik. Selanjutnya program UDF tersebut diintegrasikan ke pemodelan aliran fluida dan multi fasa dengan *software* paket FLUENT

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah agar tidak diperlukannya lagi melakukan penelitian secara eksperimen untuk mendeposisikan partikel pada suatu *porous structure* sehingga mengurangi potensi kesalahan seperti sulitnya menjaga stabilitas generator untuk *men-charge* partikel, serta mengurangi waktu dan biaya penelitian, sehingga dapat dijadikan model untuk deposisi partikel.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Deposisi Partikel

Deposisi partikel adalah suatu fenomena dimana partikel yang tersuspensi pada suatu fluida berpindah ke suatu permukaan dan membentuk lapisan yang permanen atau sementara. Fenomena deposisi partikel banyak digunakan pada berbagai bidang seperti *fouling* yang terjadi pada suatu *channel*, masalah *microcontamination* pada proses material dan desain deposisi partikel pada suatu pabrikasi suatu alat. (Masuda, 2006)

Deposisi partikel dapat dilakukan pada fase liquid atau pada fase gas. Penjelasan dari kedua fase ini sebagai berikut.

II.1.1 Deposisi Fase Liquid

Deposisi partikel tersuspensi menggunakan *electrophoretic deposition* (EPD) mendukung fenomena *electrokinetic* seperti elektroforesis, hidrolisa air, dan elektro-osmosis (Uchikoshi et al., 2001). Ketika medan listrik menunjukkan cairan dalam jumlah besar yang terdiri dari partikel tersuspensi, gerakan dari partikel bermuatan yang signifikan pada suspensi atau elektroforesis akan terlihat. Pada daerah di sekitar elektroda, terjadi deposisi partikel bermuatan di atas permukaan substrat yang berbeda muatan. Sejak saat itu, berbagai teknik untuk mendeposisikan partikel ditemukan. Namun, gelembung yang dihasilkan dari hidrolisis air dapat mengganggu deposisi dan menyebabkan partikel nm-order gagal terdepresiasi (Naim et al., 2010). *Thick film* menggunakan EPD juga berkontribusi pada elektro-osmosis yang dapat merusak lapisan deposit dan permukaan ketika waktu deposisi lama dilakukan (Besra et al., 2008). Maka dari itu, kontrol dari parameter EPD tertentu sangat penting untuk memastikan deposit yang terganggu selama proses deposisi.

Porous structure yang unik pada *film* secara luas digunakan sebagai wadah untuk logam untuk katalis dengan luas permukaan

dengan spesifikasi yang tinggi dan untuk tujuan lain seperti membran filter dari *template* yang sulit untuk nano-material. Pendekatan elektroforesis menggunakan *porous substrate* berdasarkan *anodic aluminium oxide* (AAO) atau grafit telah dilaporkan dengan menggunakan media *non-aqueous* (Haber et al., 1996).

II.1.2 Deposisi Fase Gas

Saat ini, bahan-bahan dengan *porous structure* telah secara luas dianggap dalam berbagai bidang aplikasi untuk meningkatkan daya tahan kimia strukturnya. *Porous structure* dapat digunakan sebagai *support* pada katalis (Matsumoto et al., 2000), membran filter (Kyotani et al., 2002), sebuah wadah metal untuk *coloring*, *template* yang sulit untuk nano-material (Bogart et al., 2005), dan aplikasi lain dengan tujuan fotokatalitik (Ishikawa et al., 2001). Anodisasi elektrokimia dari substrat aluminium telah banyak digunakan untuk membuat *porous structure*, karena metode ini telah dibuktikan dan prosesnya sederhana. Diameter pori dapat divariasikan dengan mengubah beberapa parameter, seperti tegangan yang diberikan, jenis elektrolit, dan waktu anodisasi.

Penyisipan partikel atau *thin film* pada *porous structure* dapat dilakukan menggunakan deposisi fase *liquid* dan gas. *Chemical vapor deposition* (CVD), *sputtering*, deposisi lapisan atom, dan deposisi plasma adalah contoh metode untuk deposisi fase gas. Metode deposisi fase gas pada studi sebelumnya dijelaskan bahwa metode ini berasal dari *gas-to-solid state* (*thin film*), sehingga kurang representatif bila digunakan sebagai *particle-to-particle route*. Selanjutnya, deposisi partikel di dalam *porous structure* dengan menggunakan partikel Ag (*pre-synthesized particles*) telah diteliti oleh Kusdianto et al. (2014). Dengan memanipulasi *surface* dari AAO menjadi konduktif, maka efisiensi deposisi partikel di dalam *porous structure* bisa ditingkatkan.

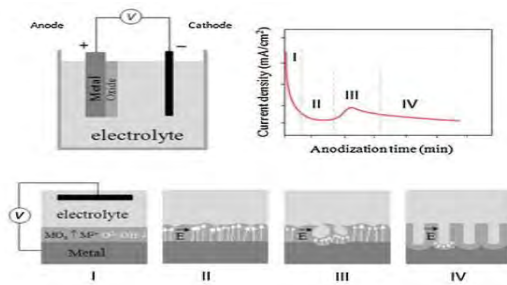
II.2 Porous Structure

Pada fenomena deposisi dibutuhkan suatu media sebagai tempat partikel terdeposisi. Pada penelitian ini digunakan material yang memiliki struktur *porous*. Dimana *porous structure* adalah suatu material yang memiliki ukuran *pore* tertentu, dimana *pore* tersebut dapat dibentuk dengan berbagai ukuran *pore* dan strukturnya. Struktur *porous* yang terbentuk seluruh permukaannya dan ruang kosong pada *pore* dapat digunakan pada bermacam-macam aplikasi. Material yang memiliki luas permukaan yang luas seperti struktur *porous* dapat digunakan sebagai katalis, reaktor kimia, dan penyimpanan gas. (Johannson, 2010)

Material yang memiliki struktur porous menurut IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) dibagi menjadi:

1. *Micropores* dimana memiliki ukuran diameter *pore* $< 2\text{nm}$,
2. *Mesopores* dimana memiliki ukuran diameter *pore* antara 2nm sampai 50 nm dan
3. *Macropores* dimana memiliki diameter *pore* $> 50\text{nm}$.

Electrochemical anodizing of aluminium adalah contoh kombinasi antara proses kimia dan fisik. Reaksi kimia terjadi setelah menerapkan tegangan tertentu. Produk dari proses ini disebut. Ilustrasi pembentukan substrat AAO digambarkan pada Gambar II.1. Awalnya, permukaan logam ditutupi dengan lapisan oksida seragam setelah menetapkan medan listrik konstan, setelah itu densitasnya akan turun dengan cepat (Tahap I). Medan listrik difokuskan lokal membentuk lubang yang ditunjukkan pada Tahap II. Pori-pori lokal pertama terbentuk dan menjadi situs untuk pertumbuhan pori selanjutnya (Tahap III). Pembentukan pori awal terjadi pada tahap ini. Akhirnya, proses pertumbuhan pori mencapai keadaan stabil dan pori-pori terdistribusi seragam akan terbentuk. (Jani et al., 2013)



Gambar II.1 Ilustrasi Pembentukan AAO

II.3 *Charged Particle*

Partikel yang akan dideposisikan pada *porous structure* adalah partikel yang memiliki muatan listrik atau biasa disebut *charged particle*. *Charged Particle* adalah partikel yang memberikan respon terhadap gaya elektrostatis di sekitar permukaan atau *charged particle* lainnya. *Charged particle* dapat memiliki muatan positif atau negatif tergantung dari sumber dan metode yang digunakan dalam pemberian muatan tersebut. (Hinds, 1999)

II.4 *Particle Tracking*

Simulasi numerik pada deposisi partikel telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya, meskipun pada kasus simulasi deposisi *charged particle* masih belum ada yang melakukannya. Simulasi awal mengenai perpindahan partikel dan deposisi partikel ditujukan untuk menganalisis pengaruh seperti suhu permukaan, diameter partikel, suhu partikel, dispersi turbulen dan sebagainya pada deposisi. Terdapat 2 metode permodelan pada deposisi partikel yaitu Euler dan Lagrangian. (Shankara, 2010)

Untuk fasa gas selalu dimodelkan dengan pendekatan Euler dimana gas diperlakukan sebagai kontinum dan dapat diselesaikan dengan baik oleh simulasi RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) atau DNS/LES (*Direct Numerical Simulation / Large Eddy Simulation*). Metode Euler - Euler memodelkan *tracking* partikel dengan berfokus pada volume kontrol sedangkan metode Euler -

Lagrangian berfokus pada *tracking* partikel. Metode Euler menganggap partikel sebagai kontinum dan mengembangkan *tracking* partikel berdasarkan persamaan konservasi yang diterapkan berdasarkan basis *volume control* dengan pengelompokan partikel pada berbagai *volume control*. (Shankara, 2010)

II.4.1 Eulerian Particle Tracking

Metode *tracking particle* Euler adalah metode yang paling disukai untuk lingkungan dalam suatu ruang (Murakami et al., 1992). Friedlander et al. (1957) mengembangkan model deposisi pertama kali berdasarkan pendekatan Euler. Menguturk dan Sverdrup (2008) mengembangkan model Euler berdasarkan pada asumsi bahwa partikel yang sangat kecil oleh karena itu untuk efek inersia dapat diabaikan. Dehbi (2008) mencatat bahwa pendekatan Euler sangat cocok hanya untuk arus dengan suspensi partikel padat di mana interaksi partikel - partikel yang cukup besar tidak dapat diabaikan. Yau & Young (1987), Wood (1981), dan Kladas (1993) menggunakan metode Euler untuk menyelesaikan permasalahan mengenai partikel atas dasar bahwa partikel berada di batas luar lapisan, sehingga memecahkan persamaan kontinuitas dalam kondisi aliran turbulen. Huang et al. (1987) dan Ahluwalia et al. (1986) menggunakan model deposisi Euler untuk mensimulasikan pengendapan partikel halus pada turbin gas batubara. Mereka berdua mengasumsikan bahwa partikel mengalami efek difusi Brown, difusi turbulen dan *thermophoresis*.

II.4.2 Lagrangian Particle Tracking.

Pendekatan Lagrangian memperlakukan partikel sebagai fase terdispersi dan *tracking* partikel secara individu. Fraksi volume partikel biasanya diasumsikan diabaikan dan pembawa volume fasa dan interaksi antar partikel biasanya diabaikan. Kallio dan Reeks (1989) menghitung pengendapan partikel dalam medan aliran turbulen dengan simulasi menggunakan model Lagrangian dalam *turbulent duct*. Mereka menyelesaikan persamaan gerak

untuk partikel dengan waktu relaksasi dari 0,3 sampai 1000. Waktu relaksasi partikel adalah suatu ukuran untuk inersia partikel dan menunjukkan skala waktu dimana setiap *slip velocity* antara partikel dan cairan diseimbangkan. Waktu relaksasi biasanya adalah waktu yang dibutuhkan oleh partikel untuk merespon perubahan dalam kecepatan cairan dan tergantung pada ukuran partikel, densitas partikel, dan viskositas fluida. Persamaan waktu relaksasi partikel adalah:

$$\tau_{12}^x = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (\text{II.1})$$

Model ini menunjukkan pendekatan yang baik dengan data eksperimen dari Liu dan Agarwal (1974). Ounis et al. (1993) dan Brooke et al. (1994) menggunakan pendekatan Lagrangian dan menyelesaikan *carrier phase flow* dengan DNS sementara Wang dan Squires (1996) menggunakan metode LES untuk mensimulasikan medan aliran dalam perhitungan Euler - Lagrangian. Guha (2008) mencatat bahwa gerakan partikel secara signifikan dipengaruhi oleh turbulensi dan fluktuasi kecepatan medan aliran sehingga diperlukan perhitungan dengan metode Lagrangian. Pendekatan Lagrangian mampu memodelkan secara lebih rinci dan realistis dalam pengendapan partikel karena persamaan gerak sesaat dapat diselesaikan untuk setiap partikel yang bergerak melalui bidang pusaran cairan. Metode ini berlaku untuk semua ukuran partikel. Selain itu, metode ini mampu memberikan informasi mengenai tabrakan partikel pada permukaan dan dapat menjelaskan *sticking model*. El - Batsh et al. (2002) merintis Lagrangian DPM (*Discrete Metode Phase*) permodelan dengan perangkat lunak CFD, FLUENT dapat memodelkan deposisi berdasarkan pendekatan Euler - Lagrangian dan berhasil menunjukkan hasil yang baik untuk berbagai kasus percobaan. Model deposisi ini didasarkan pada tiga proses: transport partikel, *particle sticking*, dan *particle detachment* dan berfungsi sebagai dasar untuk pengembangan model OSU. Ai et al. (2009) yang bekerja pada El - Batsh mempelajari interaksi partikel dan dinding pada penelitian sebelumnya. Mereka mengembangkan

dan memvalidasi model deposisi dengan hasil eksperimen deposisi pada film pendinginan. Model OSU merupakan perpanjangan dari model yang digunakan oleh Ai et al. dan dimaksudkan untuk memperluas penerapan model deposisi untuk geometri baling-baling turbin yang sebenarnya dengan film yang pendinginan.

Mazur et al. (2006) berhasil menggunakan metode LES dengan *software* CFD, FLUENT untuk simulasi deposisi partikel pada baling-baling turbin. Abuzeid et al. (1990) memodelkan gerak partikel dalam medan aliran turbulen menggunakan kedua metode Euler dan Lagrangian. Mereka menemukan bahwa simulasi Lagrangian lebih akurat daripada Euler untuk berbagai ukuran partikel. Selain itu, perhitungan tracking partikel Lagrangian memberikan informasi tentang jumlah partikel yang menumbuk permukaan, kecepatan tumbukan dan arah partikel yang relatif terhadap permukaan.

II.5 Metode *Particle Tracking* pada CFD

Metodologi pelacakan partikel yang digunakan dalam model OSU didasarkan pada *Discrete Phase Model* (DPM) dari perangkat lunak simulasi CFD, FLUENT 6.3.26. FLUENT yang digunakan untuk simulasi *tracking* partikel menggunakan Ohio *Supercomputer Center* (OSC). *Tracking* partikel dalam FLUENT dibagi menjadi dua fase: *carrier phase* dan *discrete phase*. Model DPM dalam *tracking* partikel menggunakan metode Lagrangian dan untuk medan aliran *carrier phase* diselesaikan terlebih dahulu untuk dapat mencapai kondisi *steady state* sebelum *discrete phase* dimasukkan ke dalam *carrier phase*. Partikel dianggap *discrete phase* karena *particle loading volume* diabaikan dalam semua kasus dibandingkan dengan *volume carrier phase*.

II.5.1 *Discrete Phase*

FLUENT memprediksi lintasan *discrete phase* partikel (atau *droplet* atau gelembung) dengan mengintegrasikan persamaan gaya yang bekerja pada partikel, yang ditulis dengan referensi model Lagrangian. Dimana pada persamaan gaya ini,

inersia partikel dan gaya yang bekerja pada partikel, dapat ditulis dengan (untuk arah x dalam koordinat *Cartesian*) sebagai:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (\text{II.2})$$

Dimana pada sisi kanan adalah gaya *drag* pada partikel per satuan massa partikel, sedangkan pada sisi kanan selanjutnya adalah efek gravitasi pada partikel dan gaya F_x yang menunjukkan semua gaya lainnya yang bekerja. Dalam semua simulasi dalam penelitian ini, asumsi berikut dibuat mengenai fase terdispersi berdasarkan kondisi eksperimental dan karakteristik partikel yang digunakan dalam percobaan:

- Partikel-partikel adalah rigid sphere dan mereka dianggap sebagai titik yang terletak di pusat bola.
- Kepadatan partikel lebih besar dari densitas fluida
- Partikel tidak mempengaruhi turbulensi yang terjadi pada fluida. Percobaan dengan Kulick et al. (1994) dan Kaftori et al. (1995) menunjukkan bahwa untuk fraksi volume rendah, turbulensi dapat diabaikan. Dan juga di daerah dekat dinding di mana konsentrasi partikel mungkin besar, dimana intensitas turbulensi dimodifikasi dengan jumlah partikel yang sangat kecil sehingga dapat diabaikan.
- Untuk ukuran partikel dalam penelitian ini, skala sub-grid memiliki efek yang dapat diabaikan pada lintasan partikel.
- Pengaruh kekasaran bahan tidak dipertimbangkan ketika partikel memantul pada dinding

Partikel diasumsikan berbentuk *spherical* partikel dimana pada penelitian ini beberapa gaya yang bekerja pada partikel adalah sebagai berikut:

F_x = gaya drag + added mass effect + history effect + gaya grafitasi + Gaya Buoyancy + gaya angkat + gaya intercollision + gaya Brownian + gaya thermophoresis + gaya magnus + gaya basset + gaya electrostatic

Berbagai model deposisi yang telah dilakukan telah menggunakan salah satu atau kombinasi dari gaya-gaya yang disebutkan di atas yang didasarkan pada karakteristik aliran partikel yang diharapkan. Identifikasi gaya yang mempengaruhi partikel untuk kasus tertentu sangat penting untuk *tracking* partikel yang akurat.

Gaya *drag* adalah gaya Stokes yang bekerja pada partikel karena kecepatan relatif antara cairan dan partikel terhadap arah aliran. Gaya *drag* adalah gaya yang paling dominan untuk gerakan partikel, terutama ketika partikel memiliki bilangan Reynolds kurang dari 100. Gaya *drag* didasarkan pada hukum Stokes ketika $Re_p < 1$, hukum modifikasi Stokes ketika $1 < Re_p < 500$ dan hukum Newton ketika $500 < Re_p < 2 \times 10^5$.

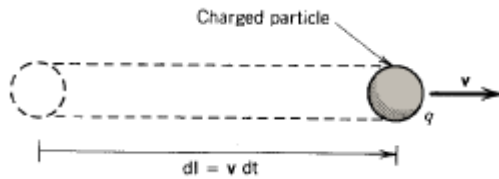
Gaya elektromagnetik merupakan gaya yang sangat mempengaruhi percepatan dan transport dari *charged particle*. Muatan pada permukaan elektroda dapat memberikan percepatan dan fokus. Gaya elektrik pada partikel pada suatu posisi dapat dijelaskan dengan rumus hukum Coulomb sebagai berikut:

$$F = \sum_n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_o q_n u_{rn}}{r_n^2} \quad (II.3)$$

Dimana q_o adalah muatan yang diberikan pada partikel dan penjumlahan dari seluruh muatan pada elektroda.

Suatu rumus sangat diperlukan untuk menjelaskan total gaya elektrik dan magnetic yang bekerja pada suatu partikel untuk mengetahui dinamika partikel tersebut. Seperti pada gambar dibawah ini dimana partikel diberikan charged sebesar q dan kecepatan sebesar v . Partikel bergerak sejauh $dt = dl/v$. dan gerakan partikel digambarkan sebagai $q/(dl/v)$. *Charged particle* yang bergerak dari posisi awal dirumuskan sebagai:

$$idl = \frac{qdl}{|dl|/|v|} = qv. \quad (II.4)$$



Gambar II.2 Ilustrasi Gerak *Charged Particle*

Metode numerik yang digunakan untuk melihat gerak *charged particle* dan pola deposisi pada substrat menggunakan model Lagrangian. Dimana diasumsikan partikel yang digunakan adalah *spherical particle*. Gaya Brownian pada partikel dapat diabaikan karena energi kinetik pada partikel disebabkan oleh medan listrik yang lebih besar gaya yang diberikan dibandingkan dengan *random thermal energy*. (Kim et al., 2006)

II.6 Model Deposisi Partikel

Tujuan utama dari permodelan deposisi adalah untuk mengakuratkan model interaksi *particle-wall*. FLUENT telah membuat batasan kondisi ketika partikel menabrak batas permukaan:

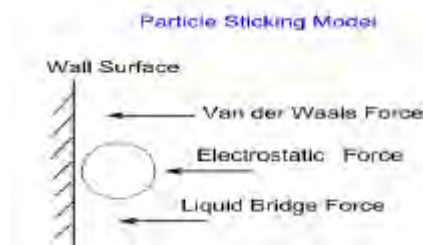
- *Reflect* – elastis atau tidak elastisnya tabrakan
- *Trap* – partikel yang terperangkap di dinding
- *Escape* – partikel yang lolos melalui batas
- *Wall-jet* – particle spray bertindak sebagai jet dengan Weber number yang tinggi dan tidak ada liquid film
- *Wall-film* – melekat, melambung, tersebar, dan berbasis flash pada dampak energy dan temperatur dinding
- *Interior* – partikel melewati zona batas dalam

Karena tidak ada kondisi batas yang akurat yang mewakili interaksi *particle-wall* pada rezim kompresor dan turbin, maka model deposisi dibuat pada FLUENT menggunakan *User Defined Functions* (UDF) yang akan berfungsi sebagai kondisi batas pada permodelan interaksi *particle-wall*. (Shankara, 2010)

II.6.1 *Particle Sticking*

Ada tiga gaya yang berkontribusi pada adhesi partikel, yaitu:

- Gaya Van der Waals – Muncul karena interaksi molekul antara permukaan padat
- Gaya Elektrostatis – Disebabkan oleh pengisian muatan partikel secara elektrik pada aliran gas
- Gaya *Liquid Bridge* – Disebabkan oleh pembentukan jembatan *liquid* antara partikel dan permukaan.



Gambar II.3 Gaya yang Terjadi pada Adhesi Partikel pada Permukaan

(sumber: Shankara, 2010)

Gaya Van der Waals adalah gaya yang paling berkontribusi untuk adhesi permukaan dalam kondisi kering (Soltani dan Ahmadi, 1994). Gaya Van der Waals dihitung menggunakan pendekatan mikroskopis dan makroskopis. Pendekatan mikroskopis berdasarkan pada interaksi individu molekul, sedangkan pendekatan makroskopis berdasarkan pada sifat sebagian bagian yang berinteraksi. Salah satu kelemahan dari teori-teori awal adalah efek dari kontak deformasi pada gaya adhesi diabaikan. Johnson et al. (1971) menggunakan energi permukaan dan efek deformasi permukaan untuk mengembangkan model. Model ini disebut teori JKR. Soltani dan Ahmadi menggunakan teori JKR sebagai dasar untuk membentuk evaluasi dari kecepatan geser kritis minimum yang akan digunakan untuk saat kritis pada pelepasan partikel. Model JKR memberikan *sticking force*

berdasarkan pada ukuran partikel dan sifat bahan dengan konstanta yang berasal dari percobaan. *Sticking force* berdasarkan model JKR adalah sebagai berikut:

$$F_{po} = k_s W_A d_p \quad (II.5)$$

dimana k_s adalah konstanta yaitu $3\pi/4$. W_A adalah *work of sticking* yaitu konstan tergantung pada sifat material partikel dan permukaannya, dengan satuan J/m^2 . Konstanta ini diperoleh dari eksperimen untuk beberapa bahan. Untuk partikel apapun, koefisien restitusi didefinisikan sebagai rasio dari kecepatan *rebound* partikel dengan kecepatan normal partikel. Ketika kecepatan normal partikel menurun, kecepatan *rebound* partikel menurun dan akhirnya mencapai titik dimana tidak ada *rebound* terjadi dan partikel tertangkap. Kecepatan dimana terjadinya penangkapan partikel ini disebut kecepatan kritis/kecepatan penangkapan (*capture velocity*) (Brach et al., 1992). Pada model ini, *capture velocity* dari partikel telah dihitung berdasarkan data eksperimen dan diberikan sebagai berikut:

$$v_{cr} = \left(\frac{2E}{dp}\right)^{10/7} \quad (II.6)$$

dimana E adalah gabungan modulus Young yang ditentukan berdasarkan modulus Young pada partikel dan permukaan. Kecepatan normal partikel (v_n) kemudian dibandingkan dengan *capture velocity*. Jika kecepatan normal partikel kurang dari *capture velocity*, maka partikel akan menempel pada permukaan, atau akan melambung.

II.7 CFD (*Computational Fluid Dynamic*)

CFD (*Computational Fluid Dynamics*) adalah teknik numerik untuk penyelesaian persamaan pengaturan aliran fluida didalam aliran fluida tertentu. Aliran fluida dapat digambarkan dengan menggunakan persamaan Navier's stoke. Persamaan ini diturunkan dengan mempertimbangkan kesetimbangan massa, momentum, dan energi di dalam elemen fluida, menghasilkan sejumlah penurunan persamaan parsial. Persamaan ini dilengkapi dengan menambahkan persamaan aljabar lain dari termodinamika

seperti persamaan keadaan untuk massa jenis dan persamaan pokok untuk menjelaskan reologi.

Kode CFD tersusun atas algoritma-algoritma numerik yang dapat menyelesaikan permasalahan aliran fluida. Suatu kode CFD terdiri dari tiga elemen utama yaitu *pre-processor*, *solver*, dan *post-processor*. (Versteeg, 2007)

Pre-processing meliputi masukan dari permasalahan aliran ke suatu program CFD dan transformasi dari masukan tersebut ke bentuk yang cocok digunakan oleh solver. Langkah-langkah dalam tahap ini:

- Pendefinisian geometri yang dianalisa.
- *Grid generation*, yaitu pembagian daerah domain menjadi bagian-bagian lebih kecil yang tidak tumpang tindih.
- Seleksi fenomena fisik dan kimia yang perlu dimodelkan.
- Pendefinisian properti fluida.
- Pemilihan *boundary condition* (kondisi batas) pada kontrol volume atau sel yang berimpit dengan batas domain.
- Penyelesaian permasalahan aliran (kecepatan, tekanan, suhu, dan sebagainya) yang didefinisikan pada titik nodal dalam tiap sel. Keakuratan penyelesaian CFD ditentukan oleh jumlah sel dalam grid.

Secara umum metode numerik solver tersebut terdiri dari langkah-langkah sebagai berikut:

- Prediksi variabel aliran yang tidak diketahui dengan menggunakan fungsi sederhana.
- Diskretisasi terhadap semua persamaan yang terlibat menjadi sistem persamaan aljabar.
- Penyelesaian persamaan aljabar dengan metode iterasi.

Post-processing merupakan tahap visualisasi dari hasil tahapan sebelumnya. *Post-processor* semakin berkembang dengan majunya *engineering workstation* yang mempunyai kemampuan grafik dan visualisasi cukup besar. Alat visualisasi tersebut antara lain :

- Domain geometri dan *display*.
- Plot vektor.

- Plot kontur.
- Plot 2D dan 3D *surface*.
- Manipulasi tampilan (translasi, rotasi, skala, dan sebagainya).
- Animasi *display* hasil dinamik.

II.7.1 Persamaan Transport Senyawa

Model-model kekekalan massa, momentum dalam koordinat kartesius adalah sebagai berikut :

1. Persamaan Kontinuitas (Hukum Kekekalan Massa)

Persamaan kontinuitas untuk suatu fluida compressible pada aliran steady state dalam notasi dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (\text{II.7})$$

Untuk aliran *incompressible*, nilai densitas ρ adalah konstan dan persamaan menjadi :

$$\text{Div}(u) = 0 \quad (\text{II.8})$$

2. Persamaan Momentum

Tiga persamaan momentum yang terdiri dari masing-masing arah disebut persamaan Navier Stokes. Pada beberapa hal, *momentum transport* akibat konveksi dan difusi, beberapa *momentum source*-nya diikutsertakan.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] + \rho g_i + F_i \quad (\text{II.9})$$

Pada persamaan (II.9), *convection term* berada pada persamaan sebelah kiri. Persamaan pada sebelah kanan merupakan *pressure gradient*, *source term*, gaya gravitasi, dan *source term* yang lain.

II.7.2 Permodelan untuk Turbulensi

Turbulensi merupakan suatu fenomena yang tidak linier, tiga dimensi, dan berubah terhadap waktu. Permodelan untuk

turbulensi yang digunakan pada penelitian ini yaitu *realizable k-ε* model. *Realizable* menunjukkan bahwa model ini bersifat fleksibel untuk *costarin mathematic* pada normal stress, dan konsisten terhadap aliran turbulen dan cocok digunakan untuk *swirling flows*. Untuk mendapatkan persamaan Reynold stresses dalam keadaan normal pada aliran *incompressible* digunakan persamaan :

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3}k - 2\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} \quad (\text{II.10})$$

$$\nu_t \equiv \frac{\mu_t}{\rho} \quad (\text{II.11})$$

Eddy viscosity dihitung dengan menggunakan persamaan

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{II.12})$$

Energi kinetik turbulen

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (\text{II.13})$$

Dimana k adalah energi kinetik turbulen dan ε adalah *dissipation rate* dari energi kinetik turbulen.

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (\text{II.14})$$

Untuk standart dan *realizable k-ε models*, i dari Pr_t adalah 0,85. *Dissipation rate* dari energi kinetik turbulen menggunakan persamaan :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (\text{II.15})$$

Dimana

$$C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right), \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (\text{II.16})$$

Permodelan Energi Kinetik

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (\text{II.17})$$

Dalam menyelesaikan *transport equation* untuk *turbulence kinetic energy* dan menentukan *boundary condition* dengan pengaruh Reynold stresses, persamaan yang digunakan adalah :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \rho \varepsilon (1 + 2M_t^2) + S_k$$

Dimana σ_k adalah 0,82. (Theory Guide, Ansys fluent 14.0) (II.18)

II.7.3 Discrete Phase Model

Untuk keakuratan data berupa *droplet drag coefficients* dalam permodelan deposisi partikel, digunakan *Dynamic Drag Model Theory*. Model ini bisa digunakan dalam berbagai kondisi. Diasumsi bahwa *droplet* tetap dalam bentuk *spherical* sepanjang domain. Untuk menentukan *drag coefficient* dari *spherical droplet* digunakan persamaan:

$$C_{d,sphere} = \begin{cases} 0,424, Re > 1000 \\ \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{\frac{2}{3}} \right), Re \leq 1000 \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

II.7.4 Stochastic Tracking

Ketika aliran turbulen, FLUENT akan memprediksi pergerakan dari partikel menggunakan kecepatan rata-rata fase fluida, \bar{u} , menggunakan persamaan :

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (\bar{u} - \bar{u}_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (\text{II.20})$$

$F_D (\bar{u} - \bar{u}_p)$ adalah *drag force per unit particle mass*.

$$\text{Dimana } F_D = \frac{18\mu C_D Re}{24\rho_p d_p^2} \quad (\text{II.21})$$

(Theory Guide, Ansys fluent 14.0)

II.7.5 Kondisi Batas untuk Wall

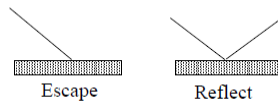
1. *Reflect model* : bila partikel mengenai dinding akan memantul seperti terlihat pada gambar II.4. Partikel memantul dari

dinding dengan perubahan momentum yang didefinisikan oleh koefisien restitusi.

$$e_n = \frac{v_{2,n}}{v_{1,n}} \quad (\text{II.22})$$

Dimana e_n didefinisikan sebagai jumlah momentum pada arah normal ke dinding.

2. *Escape model* : bila partikel melewati bagian keluaran (*outflow* atau *pressure outlet*) maka perhitungan partikel dihentikan.



Gambar II.4 Kondisi Batas untuk Permodelan *Wall*

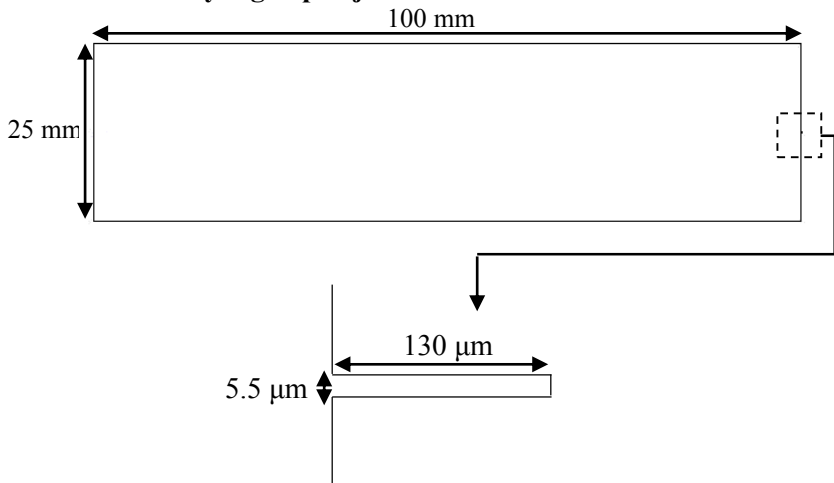
Halaman ini Sengaja Dikosongkan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan Pemodelan Lagrangian. Distribusi medan listrik dievaluasi dan pemilihan model persamaan potensial dan arus listrik yang diselesaikan secara terpisah dari FLUENT (*User Defined Function*). Selanjutnya program tersebut diintegrasikan ke pemodelan aliran fluida dan multifasa dengan *software* paket FLUENT. Untuk memodelkan dinamika partikel, dipilih model dinamika partikel yaitu model Lagrangian *Discreate Phase Model* (DPM). Pengaruh dinamika fluida, ukuran partikel, dan medan listrik terhadap dinamika partikel dievaluasi dengan berbagai kondisi operasi seperti jumlah *pore* dan potensial listrik yang diberikan. Hasil yang diharapkan utamanya adalah pengembangan model dengan CFD yang sesuai untuk sistem *charged particle deposition*

III.1 Sistem yang Dipelajari



Gambar III.1 Dimensi Simulasi *Charged Particle Deposition*

Gambar III.1 menunjukkan gambar dari metode deposisi *charged particle* secara 2 dimensi. Eksperimen set yang dimodelkan adalah berupa sebuah persegi panjang sebagai *wall* dimana terdapat *charged particle* dan *porous structure substrate*.

III.2 Kondisi Batas

Kondisi batas yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. *Porous structure plate* sebagai *collecting plate*/substrat sebagai tempat partikel terdeposisi yang dianggap sebagai *wall* dengan *setting* sebagai *trapped*.
2. *Substrate* bagian atas dan bawah *porous structure* sebagai *wall* dengan *setting* sebagai *escaped*.
3. Bagian atas, bawah dan dinding sebagai *wall* dengan *setting* *reflect*.
4. *Cone jet* sebagai *inlet charged particle* didefinisikan sebagai *velocity inlet* dimana kecepatan fluida masuk didefinisikan sebagai variabel.
5. *Outlet* fluida sebagai *outflow*

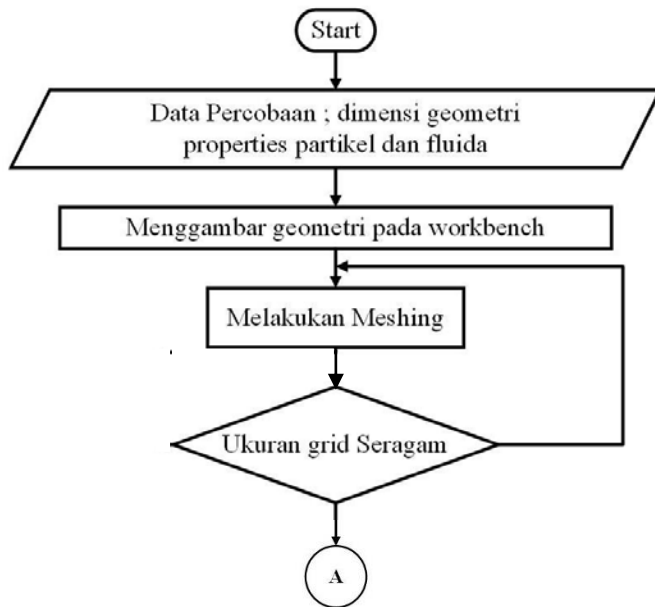
III.3 Prosedur Penelitian untuk Permodelan

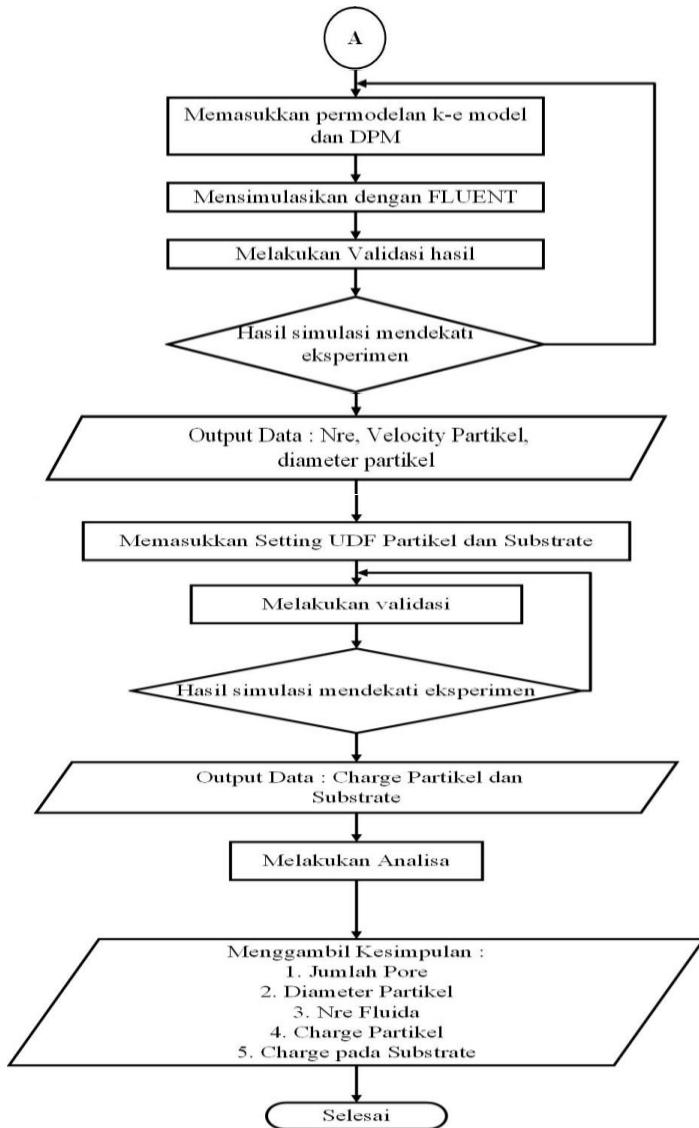
Untuk mempelajari karakteristik aliran, distribusi kecepatan, jumlah partikel yang terdeposisi, dan voltase yang diberikan pada partikel dan *substrate*, digunakan *charged particle deposition* dua dimensi secara simulasi dengan menggunakan *software Computational Fluid Dynamics (CFD) FLUENT*.

Langkah–langkah yang digunakan meliputi :

1. Membuat geometri model 2 dimensi dengan ukuran 100 mm x 25 mm.
2. Melakukan *meshing* untuk membagi bidang geometri menjadi bidang-bidang yang lebih kecil sampai dengan nilai *skewness* dibawah 10% serta memberikan definisi *cone jet inlet*, *wall*, dan *substrate*.
3. Mengimport *grid* ke dalam FLUENT dan memeriksa *grid* tersebut sampai dapat terbaca pada FLUENT.
4. Memilih formulasi *solver*, dimana mengaktifkan:

- Langrangian model (*Discreate Phase Model*) sebagai permodelan partikel.
 - Model aliran laminar dan k- ϵ turbulen model sebagai permodelan fluida.
5. Memberikan *properties* partikel Ag (*silver*), *properties* fluida berupa CO₂ fase gas dan bentuk partikel yaitu *spherical*.
 6. Memasukkan jumlah partikel yang akan diinjeksikan ke dalam *chamber* yaitu 1000 partikel.
 7. Memberikan kondisi batas pada dinding berupa *reflect*, *substrate* bidang datar berupa *escape*, dan *pore* dengan *trap*.
 8. Menampilkan hasil penyelesaian berupa vektor fluida, *particle tracking*, jumlah partikel terdeposisi dan distribusi kecepatan fluida serta melakukan analisa terhadap hasil yang diperoleh (*post-processing*).





Gambar III.2 Flowchart Simulasi Deposisi *Charged Particle*

III.4 Variabel Penelitian

Variabel penelitian ini adalah :

Variabel terikat :

- Jarak partikel dan substrate
- Jumlah partikel

Variabel bebas :

- Diameter partikel
- Kondisi fluida *carrier phase*
- Jumlah *pore*
- Muatan pada partikel

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Proses Deposisi dan Pemilihan Model pada CFD

Partikel yang digunakan pada proses deposisi *charged aerosol* partikel dalam simulasi ini adalah partikel Ag (*Silver*). Partikel ini disiapkan dengan cara mencampur Ag *sol* dan rhodamine 6G yang merupakan *fluorescence material*. Pada metode eksperimen, *fluorescence material* digunakan agar partikel Ag yang terdeposisi pada *substrate* dapat terlihat dengan jelas pada analisa *fluorencence microscopy*. Fluida yang digunakan sebagai *sheat air* adalah karbondioksida, sedangkan substratnya menggunakan AAO. (Kusdianto, 2014)

Proses deposisi secara eksperimen yang akan disimulasikan menggunakan tekanan operasi 1 atm dan suhu 373 K. Kondisi operasi 1 atm dipilih karena apabila kondisi deposisi pada keadaan vakum atau tekanan dibawah 1 atm, maka akan terdapat gaya tambahan yang timbul pada deposisi akibat gaya tarik yang muncul. Gaya tarik ini muncul dikarenakan perbedaan tekanan operasi dengan kondisi sekitar dimana pada *chamber* deposisi terdapat aliran keluar *chamber*. Selain itu gaya tarik yang timbul dapat membuat gaya elektrik menjadi terabaikan karena gaya elektrik mungkin dapat jauh lebih kecil daripada gaya tarik akibat perbedaan tekanan. Suhu 373 K digunakan karena pada proses deposisi ini partikel diinjeksikan pada kondisi *droplet* yaitu campuran partikel Ag, rhodamine 6G, dan air. Sehingga digunakan suhu 373 K agar air dapat teruapkan dan kondisi partikel saat akan terdeposisi adalah kondisi *dry* partikel. Tujuan dibuat pada kondisi *dry* partikel agar *substrate* tidak rusak akibat dari *droplet* yang masih memiliki diameter cukup besar. Sehingga pada simulasi ini digunakan kondisi tekanan 1 atm dan temperature 373 K. (Kusdianto, 2014)

Pada simulasi CFD, eksperimen ini digambarkan dengan menggunakan permodelan laminar dan turbulen untuk kondisi fluida. Setelah N_{Re} diketahui permodelan *fluida* dapat dipilih. N_{Re}

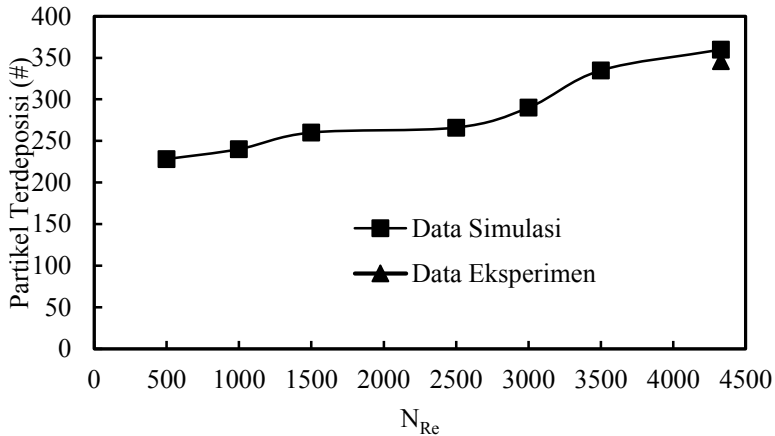
yang digunakan dari N_{Re} 500-30.000. Pada kondisi *fluida* laminar menggunakan permodelan laminar sedangkan untuk kondisi turbulen menggunakan standar k- ϵ turbulen model. Permodelan standar k- ϵ dipilih karena relatif stabil dan hanya menggunakan tambahan 2 persamaan untuk diselesaikan sehingga tidak akan membuat *run model* terlalu lama. Kelemahan dari model ini adalah tidak mampu untuk memodelkan *swirling flow*, namun karena pada deposisi ini tidak terdapat *swirling flow* sehingga masih dapat digunakan. Model ini memiliki akurasi hasil yang baik pada *range turbulen* yang besar dan *pressure gradient* yang kecil. (Ansys Fluent Theory Guide, 2013)

Untuk partikel, digunakan model *langrangian DPM* (*Discrete Phase Model*) dengan gaya yang bekerja pada partikel adalah *drag force* dan *electrical force*. Pendekatan model *langrangian* dapat digunakan pada partikel yang terdispersi pada *carrier phase* dan *tracking partikel* secara individual. Pendekatan ini dapat digunakan apabila *volume fraction* dari partikel maksimum adalah 10 % dari *carrier phase* sedangkan *volume fraction* pada deposisi ini adalah $2.8 \times 10^{-8} \%$ (Heiredal, 2010). Fase terdispersi pada permodelan ini juga dapat memodelkan terjadinya pertukaran momentum energi ataupun massa. Selain itu juga dapat digunakan untuk semua ukuran partikel dan juga memberikan informasi pada *boundary condition* sehingga cocok untuk model deposisi. Menurut El-Batsh (2002), permodelan ini sudah terbukti dapat dengan baik memodelkan deposisi *ash particle* pada *turbine cascades* dan disertai validasi dengan eksperimen.

IV.2 Validasi Hasil Eksperimen dengan Simulasi

Pada eksperimen deposisi partikel pada *porous structure* yang telah dilakukan oleh Kusdianto (2014), partikel yang digunakan adalah partikel yang berupa *droplet* yang merupakan campuran partikel Ag, rhodamine 6G, dan air. Partikel yang digunakan memiliki ukuran 7.6×10^{-5} mm dengan ukuran pore 5.5×10^{-3} mm serta memiliki kedalaman 1.3×10^{-1} mm. *Fluida carrier phase* memiliki flow rate 1 liter/menit dengan diameter jet

4 mm sehingga setelah dilakukan perhitungan, didapatkan N_{Re} fluida adalah 4329.



Gambar IV.1 Grafik Validasi Hasil Eksperimen dan Simulasi

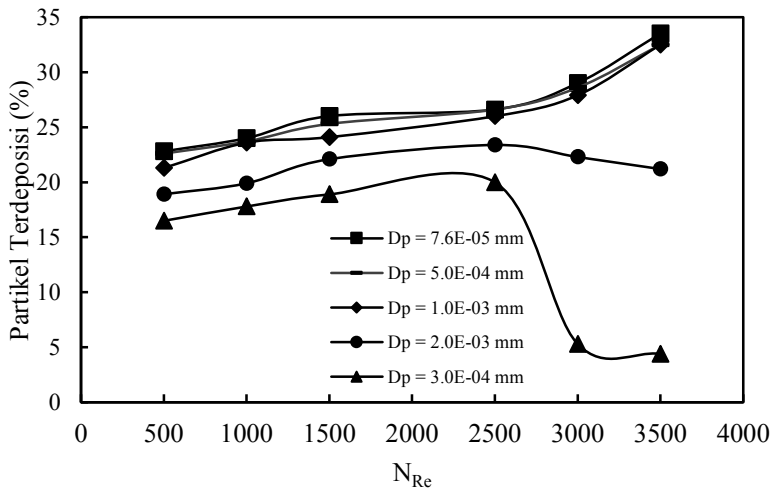
Pada data hasil eksperimen didapatkan bahwa luas partikel terdeposisi per luas *pore* adalah $2.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 / 1 \mu\text{m}^2$ (Kusdianto, 2014). Sehingga dengan diameter partikel yang diketahui yaitu $7.6 \times 10^{-5} \text{ mm}$ bisa didapatkan jumlah partikel yang terdeposisi. Luas area 1 *pore* yang digunakan pada simulasi adalah $1.573 \mu\text{m}^2$ sehingga didapatkan jumlah partikel yang terdeposisi di 1 *pore* pada hasil eksperimen yaitu 346 partikel. Sedangkan pada hasil simulasi didapatkan jumlah partikel adalah 360. Selisih antara hasil simulasi dan eksperimen ini adalah 3.76 %, sehingga simulasi ini masih cukup valid untuk digunakan mengambil data pada kondisi yang berbeda pada permodelan deposisi partikel.

IV.3 Ukuran Partikel Optimum pada Deposisi Partikel

Ukuran partikel memiliki peran penting dalam deposisi partikel, apabila ukuran partikel lebih besar daripada *pore* ataupun sama dengan *pore* tentu tidak akan terjadi deposisi. Apabila partikel semakin kecil maka semakin banyak yang dapat terdeposisi. Namun untuk membuat partikel berukuran sangat

kecil sangatlah sulit. Sehingga perlu diketahui ukuran partikel optimum yang dapat dideposisikan.

Pada simulasi dengan CFD ini ukuran partikel divariasikan dari ukuran 7.6×10^{-5} mm, 5.0×10^{-4} mm, 1.0×10^{-3} mm, 2.0×10^{-3} mm, dan 3.0×10^{-3} mm dengan ukuran *pore* adalah 5.5×10^{-3} mm. Jumlah partikel yang diinjeksikan adalah 1000 partikel. Pada gambar IV.2 dibawah ini dapat dilihat bahwa pada kondisi fluida laminar dan transisi jumlah partikel yang terdeposisi semakin banyak saat N_{Re} naik untuk partikel ukuran 7.6×10^{-5} mm sampai 1.0×10^{-3} mm.



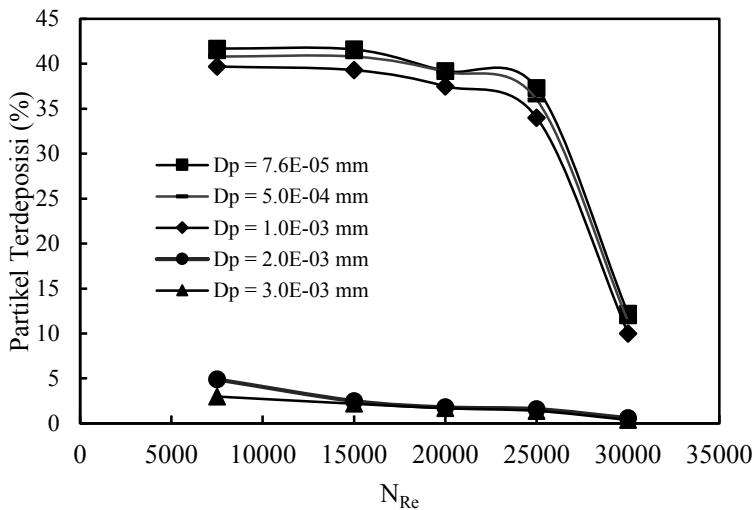
Gambar IV.2 Pengaruh Diameter Partikel pada *Range* N_{Re} 500-3500

Jumlah terbesar partikel terdeposisi adalah saat ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm, yaitu 360 pada N_{Re} 3500. Namun untuk ukuran partikel 2.0×10^{-3} mm dan 3.0×10^{-3} mm jumlah partikel terdeposisi maksimal pada keadaan N_{Re} 2500, pada N_{Re} diatas 2500 jumlah partikel terdeposisi semakin menurun. Hal ini dikarenakan ukuran partikel yang cukup besar bila dibandingkan dengan *pore*

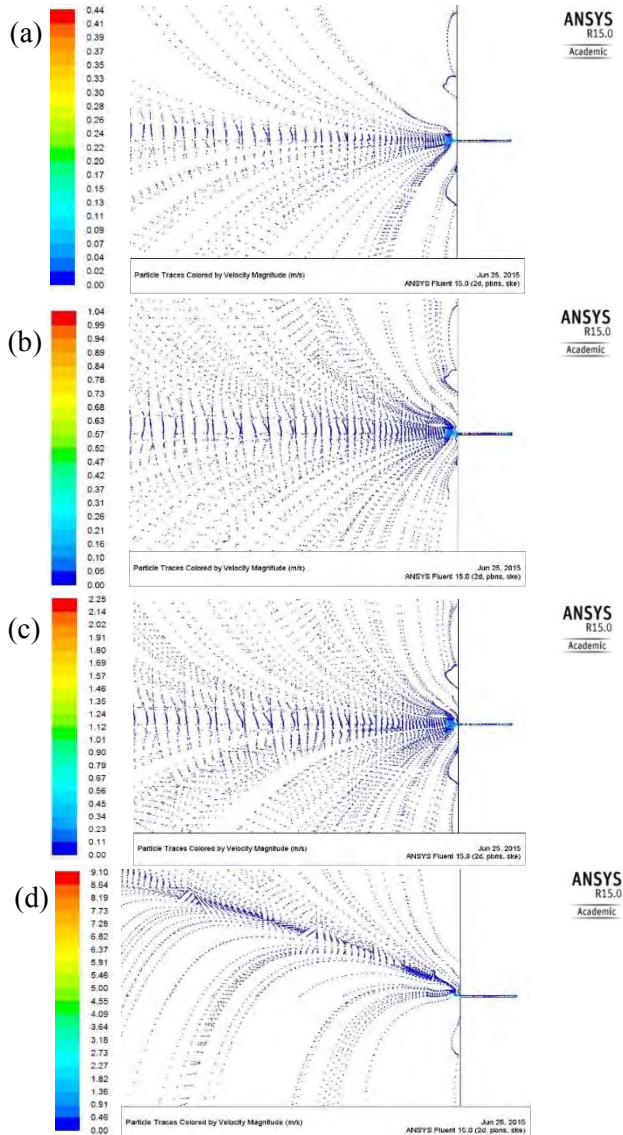
substrate sehingga hanya pada kondisi laminar dimana fluida bergerak lurus menuju *pore* diameter yang dapat terdeposisi optimum, saat transisi dimana mulai terdapat sangat sedikit turbulensi, pada ukuran partikel 2.0×10^{-3} mm dan 3.0×10^{-3} mm jumlah partikel terdeposisi mulai menurun.

Pada ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm sampai 1.0×10^{-3} mm memiliki selisih jumlah terdeposisi sangat kecil hingga deviasi masih dibawah 5%. Sehingga untuk deposisi pada kondisi laminar dan transisi untuk partikel sampai ukuran 1.0×10^{-3} mm masih optimum untuk digunakan atau tidak jauh dengan ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm.

Pada gambar IV.2 dapat dilihat bahwa pada Nre 7500 adalah titik maksimum jumlah deposisi partikel untuk setiap ukuran partikel. Pada Nre 15000 dapat dilihat sudah terjadi penurunan jumlah partikel yang terdeposisi hingga saat Nre 30000 adalah titik terendah jumlah partikel yang terdeposisi dan penurunan jumlah yang paling besar mencapai 70% dari jumlah partikel terdeposisi sebelumnya.

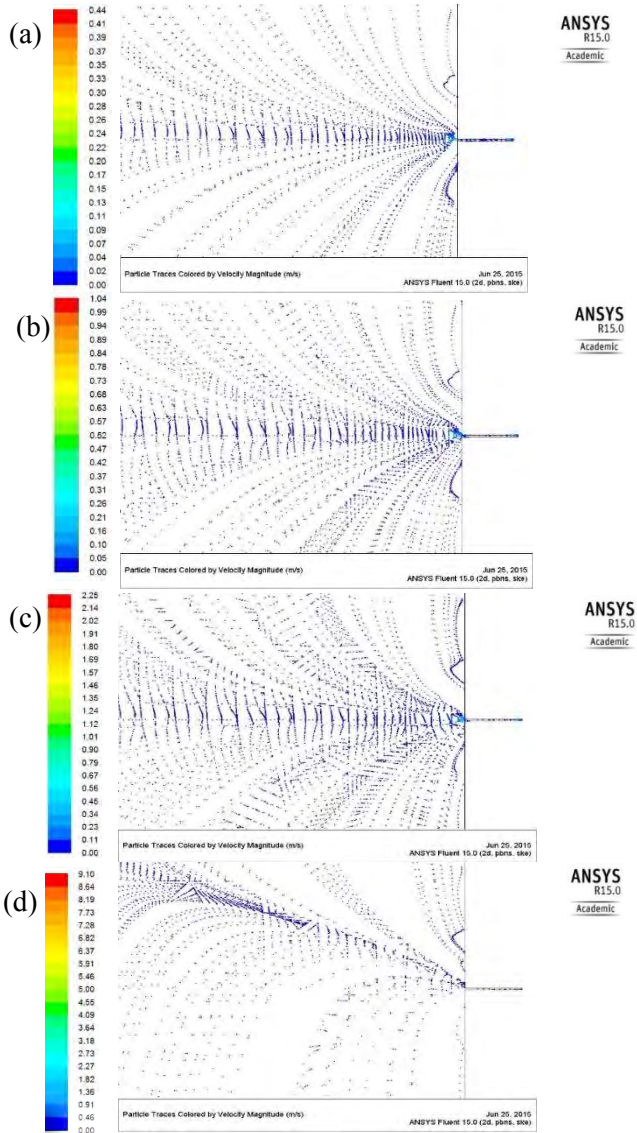


Gambar IV.3 Pengaruh Diameter Partikel pada Range N_{Re} 7500-30000



Gambar IV.4 Gerak Partikel untuk Ukuran Partikel 7.6×10^{-5} mm dengan N_{Re} : (a) 1500; (b) 3500; (c) 7500; (d) 30000

Dari gambar di atas dapat dilihat jumlah partikel yang terdeposisi untuk ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm pada aliran laminar (N_{Re} 1500) lebih sedikit daripada aliran transisi (N_{Re} 3500), dan terbanyak pada aliran turbulen (N_{Re} 7500), namun setelah itu menurun hingga paling sedikit pada N_{Re} 30000. Kecepatan partikel saat mendekati *pore* pada aliran laminar adalah 0.02 m/s, lebih kecil daripada aliran transisi dengan kecepatan 0.05 m/s sehingga pada saat kecepatan lebih besar jumlah partikel lebih banyak yang terdeposisi. Selain itu, pada aliran laminar dan transisi tidak terjadi turbulensi sehingga aliran partikel masih lurus dan tidak banyak mendapat gangguan. Pada aliran mulai turbulen yaitu N_{Re} 7500, partikel memiliki kecepatan 2 kali lebih besar daripada N_{Re} 3500 yaitu 0.11 m/s sehingga jumlah partikel terdeposisi semakin banyak yaitu mencapai 417 dan gangguan turbulensi juga masih sangat sedikit sehingga tidak terlalu mengganggu aliran partikel. Pada saat N_{Re} mulai naik ke 15000 dan sampai 25000 jumlah partikel terdeposisi semakin menurun karena mulai semakin banyak terdapat vorteks dan ketidakstabilan gerak partikel sampai pada N_{Re} 30000 dimana vorteks yang terjadi cukup besar pada tengah-tengah *chamber* sehingga jumlah partikel deposisi sangat menurun hingga 70 % dari jumlah sebelumnya.



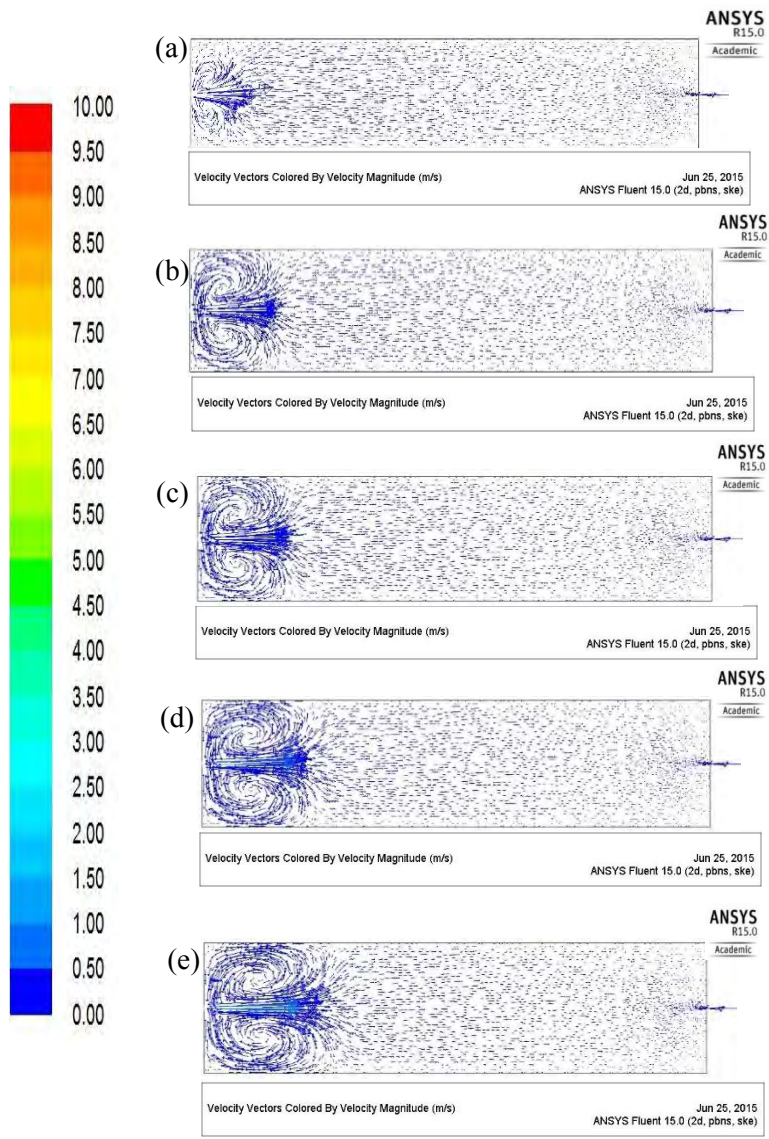
Gambar IV.5 Gerak Partikel untuk Ukuran Partikel 3.0×10^{-5} mm dengan N_{Re} : (a) 1500; (b) 3500; (c) 7500; (d) 30000

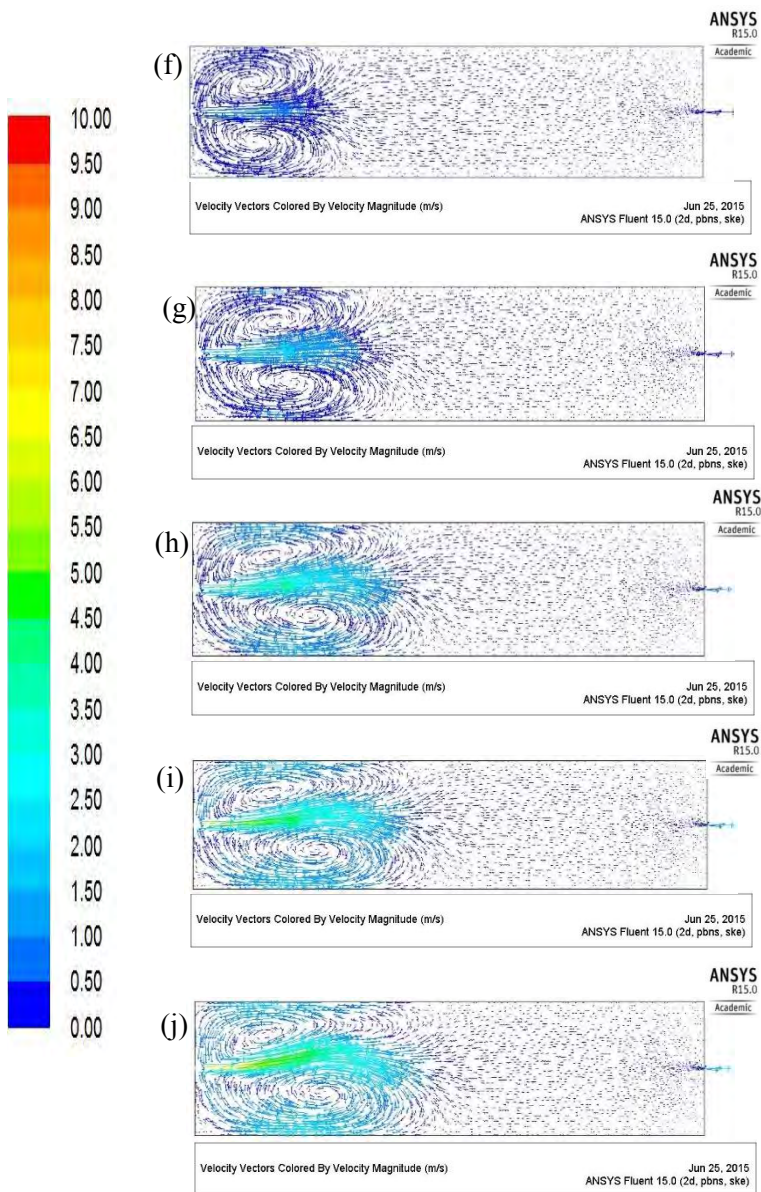
Pada gambar IV.5 di atas, ukuran partikel yang diamati adalah ukuran partikel 3.0×10^{-3} mm. Pada kondisi laminar (N_{Re} 1500) jumlah partikel yang terdeposisi paling banyak adalah dengan jumlah 189. Hal ini dapat dilihat dari gerak partikel lebih banyak berada di tengah *chamber* atau tepat berhadapan dengan *pore*, sedangkan saat N_{Re} meningkat, gerak partikel mulai semakin banyak terdapat pada sisi atas dan bawah *chamber* sehingga jumlah partikel terdeposisi semakin turun hingga saat N_{Re} 30000 dimana hampir sebagian besar gerak partikel berada di sisi atas *chamber* sehingga jumlah partikel yang terdeposisi sangat sedikit.

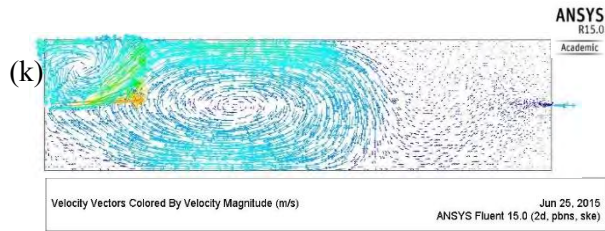
Pada ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm, 5.0×10^{-4} mm, dan 1.0×10^{-3} mm partikel yang terdeposisi masih optimum saat kondisi laminar, transisi, dan sedikit turbulen pada N_{Re} 7500 dan ketiga ukuran partikel hanya terdapat sedikit perbedaan jumlah yaitu dengan *deviasi* dibawah 5%. Sedangkan untuk ukuran partikel 2.0×10^{-3} mm dan 3.0×10^{-3} mm, partikel yang terdeposisi optimum pada kondisi laminar, saat transisi sudah mulai semakin kecil, hingga turbulen yang paling kecil.

IV.4 Kondisi Fluida *Carrier Phase* Optimum pada Deposisi Partikel

Seperti telah dibahas sebelumnya, kondisi fluida *carrier phase* sangat mempengaruhi deposisi partikel, munculnya vorteks atau pusaran dapat membuat partikel terperangkap pada pusaran. Semakin besar pusaran atau vorteks tentunya akan membuat semakin sedikit partikel yang terdeposisi karena konsentrasi partikel lebih tinggi pada pusaran yang terbentuk.



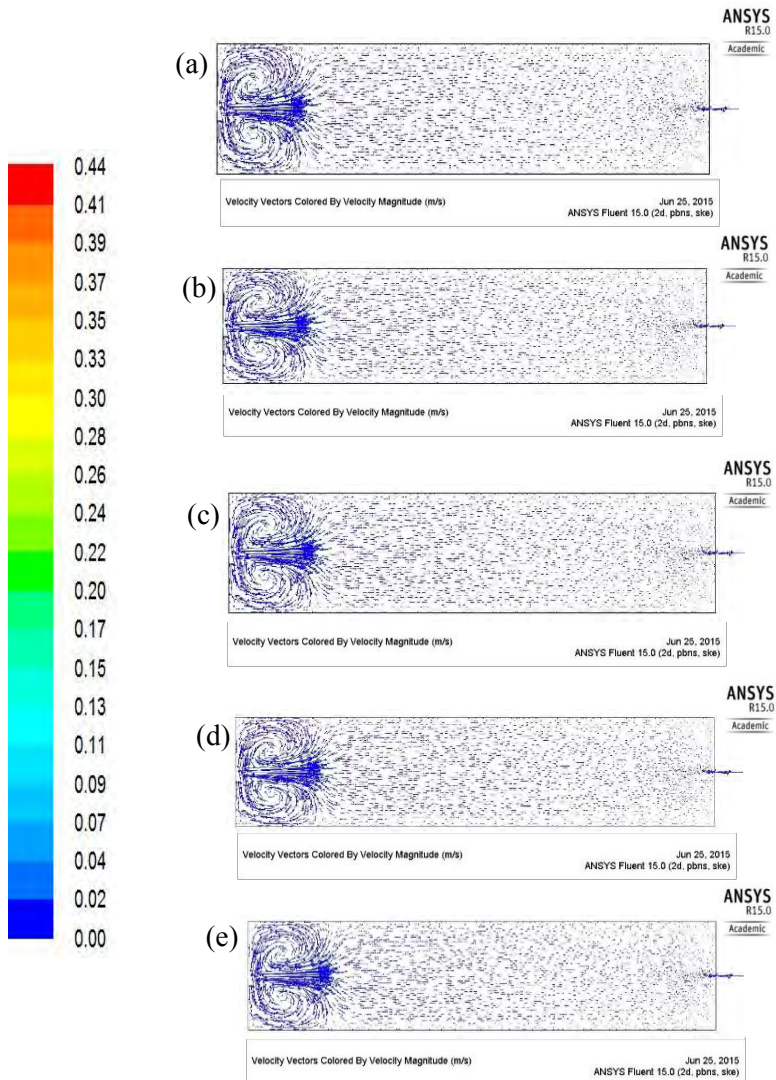




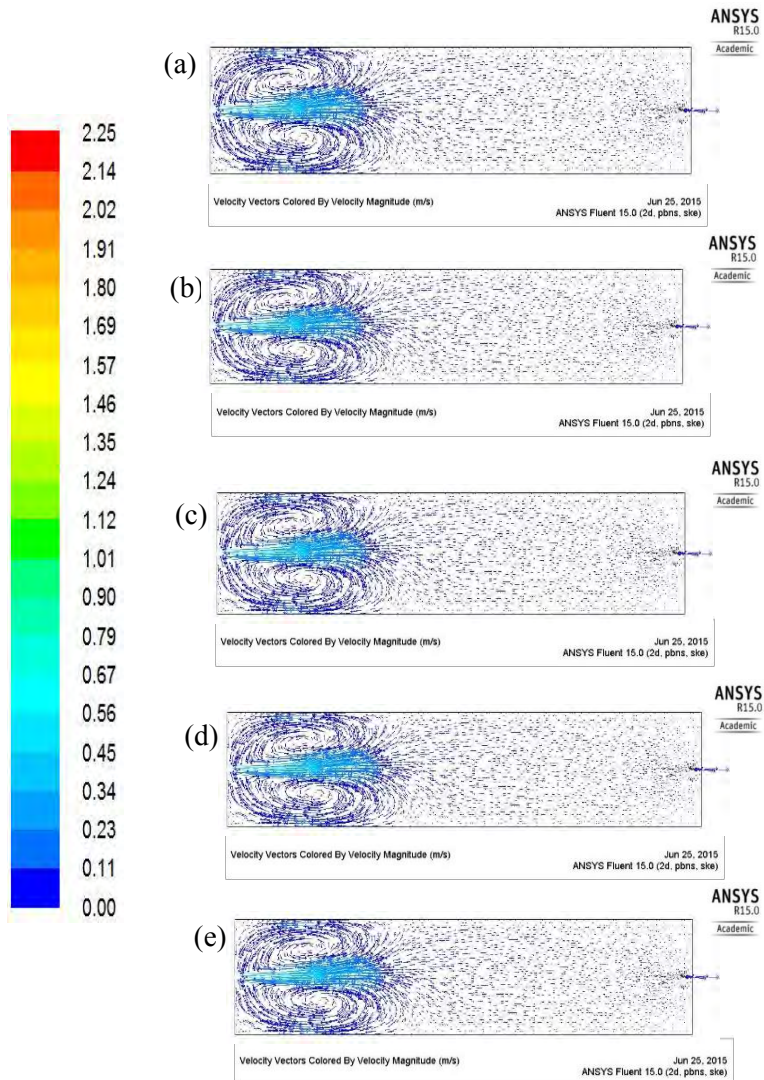
Gambar IV.6 Vektor Fluida untuk Ukuran Partikel 7.6×10^{-5} mm dengan N_{Re} : (a) 500; (b) 1000; (c) 1500; (d) 2500; (e) 3000; (f) 3500; (g) 7500; (h) 15000; (i) 20000; (j) 25000; (k) 30000

Pada gambar IV.6 di atas dapat terlihat dengan jelas pusaran yang terbentuk pada tiap N_{Re} fluida *carrier phase*. Pada N_{Re} 500, 1000, 1500, pusaran yang terbentuk sangat kecil hanya pada dekat *inlet* partikel dan fluida memiliki velocity 0.01-0.02 m/s setelah melewati titik pusaran sehingga masih cukup banyak terdapat partikel yang terdeposisi antara 228-260 partikel. Pada aliran transisi pusaran yang terbentuk semakin membesar namun masih memberikan *streamline* yang lurus mulai dari tengah *chamber* hingga *pore*. Fluida *carrier phase* memiliki kecepatan yang lebih tinggi daripada aliran laminar yaitu 0.04-0.05 m/s sehingga jumlah partikel terdeposisi masih terus meningkat hingga mencapai 335 partikel. Pada aliran turbulen dengan N_{Re} 7500 dimana jumlah partikel terbanyak yang dapat terdeposisi mencapai 417 dapat dilihat memiliki *velocity* fluida hingga 0.11 m/s dan bentuk pusaran dan keluaran partikel dan fluida masih mengikuti aliran transisi dan laminar. (Jin-Yook, 2013)

Pada N_{Re} 15000 hingga 25000 mulai terlihat partikel dan fluida mulai sedikit tertarik kesisi atas *chamber*. Semakin tinggi N_{Re} , semakin meningkat aliran fluida dan bentuk pusaran semakin membesar. Hal ini menyebabkan jumlah partikel terdeposisi menurun karena partikel terkonsentrasi atau terjebak pada pusaran yang cukup besar yang terjadi. Pada saat N_{Re} 30000, pusaran yang terbentuk sangat besar seperti terlihat pada tengah-tengah *chamber* sehingga partikel yang terdeposisi sangat menurun drastis.



Gambar IV.7 Vektor Fluida pada N_{Re} 1500 untuk Ukuran Partikel: (a) 7.6×10^{-5} mm; (b) 5.0×10^{-4} mm; (c) 1.0×10^{-3} mm; (d) 2.0×10^{-3} mm; (e) 3.0×10^{-3} mm

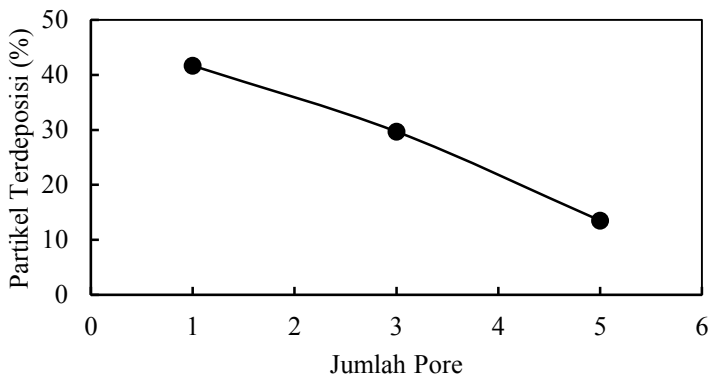


Gambar IV.8 Vektor Fluida pada N_{Re} 7500 untuk Ukuran Partikel: (a) 7.6×10^{-5} mm; (b) 5.0×10^{-4} mm; (c) 1.0×10^{-3} mm; (d) 2.0×10^{-3} mm; (e) 3.0×10^{-3} mm

Seperti yang terlihat pada gambar IV.7 dan gambar IV.8, diameter partikel tidak terlalu mempengaruhi gerak fluida. Pada diameter partikel yang lebih besar yaitu 5.0×10^{-4} mm, 1.0×10^{-3} mm, 2.0×10^{-3} mm, hingga 3.0×10^{-3} mm memiliki gerak fluida yang sangat mirip dengan ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm. Hal ini dikarenakan *volume fraction* diameter partikel terbesarpun masih sangat kecil yaitu 2.88×10^{-7} sehingga besar diameter partikel tidak terlalu mempengaruhi gerak fluida *carrier phase*. Fluida baru akan terpengaruh pada partikel apabila *volume fraction* partikel mencapai 10%. (Heiredal, 2010)

IV.5 Pengaruh Jumlah *Pore* terhadap Deposisi Partikel

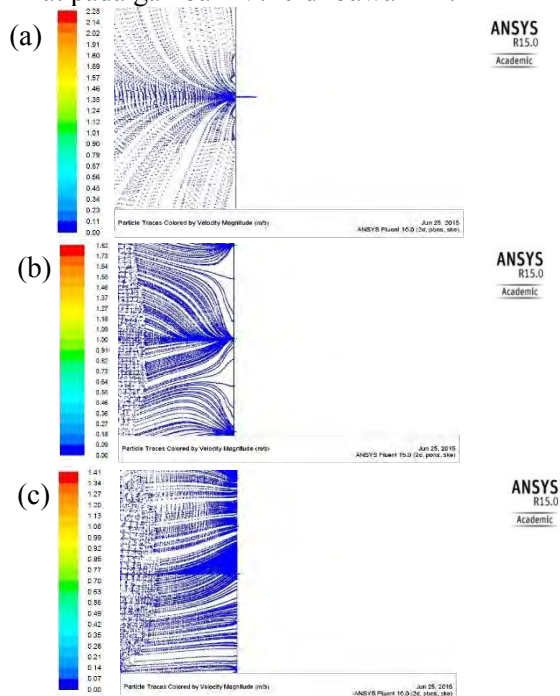
Pada pembahasan sebelumnya didapatkan bahwa fluida yang optimum yang dapat menghasilkan deposisi partikel terbanyak terdapat pada kondisi N_{Re} 7500 dengan ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm. Dan jumlah partikel yang diinjeksikan berjumlah 1000 tidak mempengaruhi gerak fluida sebagai *carrier phase*. Sehingga pada variabel jumlah *pore* digunakan kondisi optimum dari pembahasan sebelumnya.



Gambar IV.9 Pengaruh Jumlah *Pore* Terhadap Jumlah Partikel Terdeposisi

Seperti yang terlihat pada Gambar IV.9, semakin banyak jumlah *pore* maka akan menghasilkan jumlah partikel terdeposisi yang semakin menurun. Seharusnya semakin banyak *pore* partikel yang terdeposisi semakin banyak. Pada simulasi ini menghasilkan jumlah partikel terdeposisi yang menurun dimana pada jumlah *pore* 1 terdapat 417 partikel, pada 3 *pore* menjadi 297 dan pada 5 *pore* menjadi hanya 135.

Hal ini dapat disebabkan oleh letak *pore* yang tidak terpusat atau tidak berada di titik-titik yang berdekatan. Pada jumlah *pore* 3 dimana memiliki total panjang antar *pore* adalah 12.48 mm, sedangkan pada jumlah *pore* 5 memiliki total panjang antar *pore* adalah 16.64 mm. Sehingga gerakan partikel menjadi menyebar seperti yang terlihat pada gambar IV.10 di bawah ini.



Gambar IV.10 Gerak Partikel pada Jumlah *Pore* : (a) 1 *pore*;
(b) 3 *pore*; (c) 5 *pore*

Pada jumlah *pore* 1, seluruh partikel terdorong oleh gerak fluida yang menuju pusat *pore* dimana hanya terdapat 1 *pore* di tengah. Sedangkan pada jumlah *pore* 3 gerakan partikel merata di ketiga *pore* dan fluida mulai terbagi saat mendekati *pore*. Hal ini menyebabkan mulai banyak partikel yang terdeposisi pada *flat surface*, dan tidak pada *pore*, sehingga jumlah partikel terdeposisi menjadi menurun. Pada jumlah *pore* 5 gerakan partikel semakin terbagi yang menuju *pore*. Sehingga semakin banyak partikel yang terdeposisi pada *flat surface* akibat dari gerak fluida yang mendorong partikel menuju *pore* terbagi pada ke 5 *pore*.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa apabila jumlah *pore* partikel dibuat semakin banyak, sebaiknya diletakkan saling berdekatan dan berada di pusat *chamber* sehingga jumlah partikel yang terdeposisi semakin banyak, apabila dibuat semakin menyebar, jumlah partikel yang terdeposisi akan semakin menurun.

IV.6 Pengaruh *Electric Force* pada Deposisi Partikel

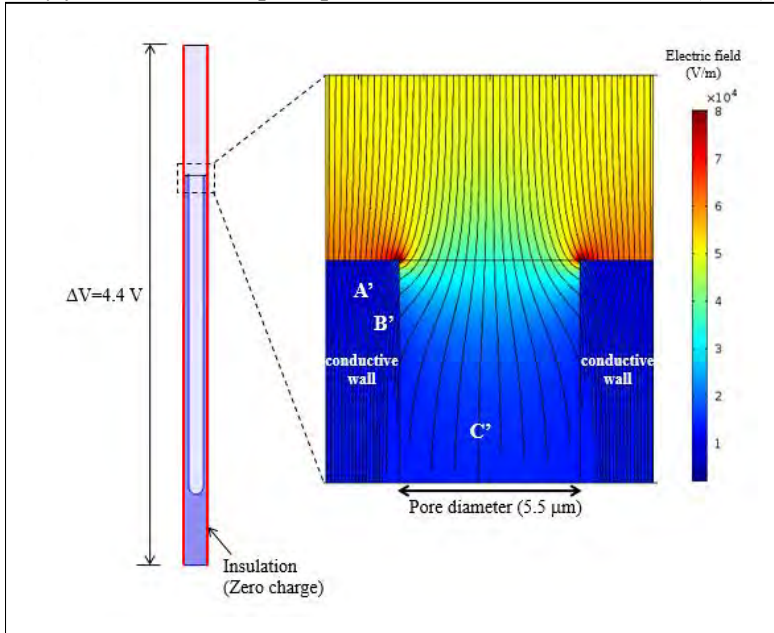
Gaya elektrik adalah salah satu gaya tambahan yang dapat membuat deposisi partikel semakin banyak karena beda muatan antara *pore* dan partikel. Apabila beda muatan sangat besar, gaya elektrostatik dapat 1000 kali lebih besar daripada gaya gravitasi (Hinds,1999). Pada model deposisi ini gaya yang digunakan adalah gaya coulomb sebagai *fundamental equations* untuk gaya elektrik. Gaya coulomb adalah gaya tarik menarik atau tolak menolak yang timbul akibat beda muatan antara 2 titik baik itu partikel dan partikel ataupun partikel dengan suatu objek. Persamaan gaya coulomb adalah :

$$F_e = q_p \times E \quad (\text{Park,2013})$$

Dimana E atau *electric field strength* pada 1 titik *point*, q_p adalah muatan pada partikel.

Nilai *charged particle* adalah 3.8×10^{-16} C. Untuk nilai *electric field* pada tiap titik akan berbeda, semakin dekat jarak dan besar muatan akan membuat semakin besar *electric field*. Sehingga

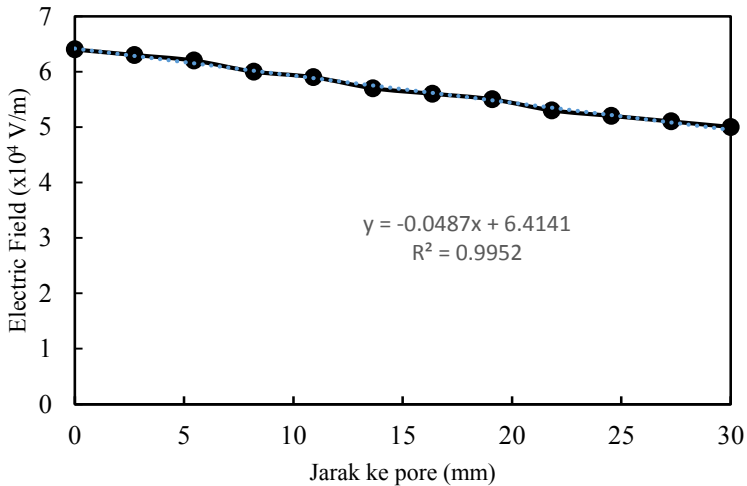
pada simulasi ini selain harus sudah mengetahui muatan pada partikel, perlu diketahui juga melalui suatu persamaan nilai *electric field strength* di masing-masing titik sehingga dapat memberikan *body force* tambahan pada partikel sesuai rumus dari Park (2013).



Gambar IV.11 Hasil Simulasi dengan COMSOL Mengenai *Electric Field Strength* pada Setiap Titik di Satu Pore (sumber: Kusdianto et al., 2014)

Pada simulasi dengan CFD diperlukan data mengenai *electric field strength* di setiap titik agar dapat ditulis menjadi suatu persamaan fungsi antara jarak dan *electric strength*. Sehingga dapat digunakan pada UDF yang akan ditulis. Apabila nilai *electric strength* ditetapkan atau constant maka akan terjadi ketidaksesuaian dengan teori coulomb *force* dimana *electric strength* di tiap titik berbeda.

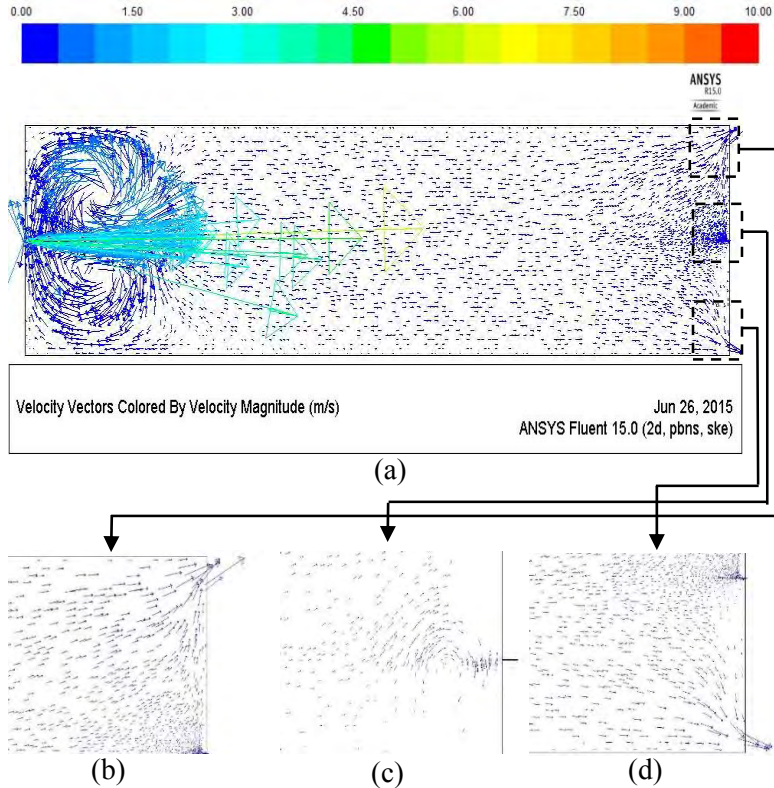
Dari data dengan simulasi COMSOL didapatkan *electric field strength* di tiap titik seperti yang terlihat pada Gambar IV.5. Pada Gambar IV.6 adalah data di setiap titik dari hasil simulasi dengan COMSOL. Dapat terlihat saat jarak titik dengan substrate 0 mm, maka electric field memiliki nilai tertinggi, semakin jauh akan semakin kecil.



Gambar IV.12 Nilai *Electric Field* pada Tiap Titik Hasil Simulasi COMSOL

Setelah data-data yang diperlukan untuk menulis UDF lengkap, maka selanjutnya dilakukan penulisan *coding*, setelah itu melakukan *interpreted* UDF, dan *hooking* pada *body force* di dalam menu *Discreate Phase Model*.

Pada simulasi dengan CFD dilakukan variasi terhadap muatan yang diberikan pada partikel. Untuk keadaan chamber sedikit diubah dimana diberikan keluaran atau outflow untuk fluida pada sisi atas dan bawah substrat.

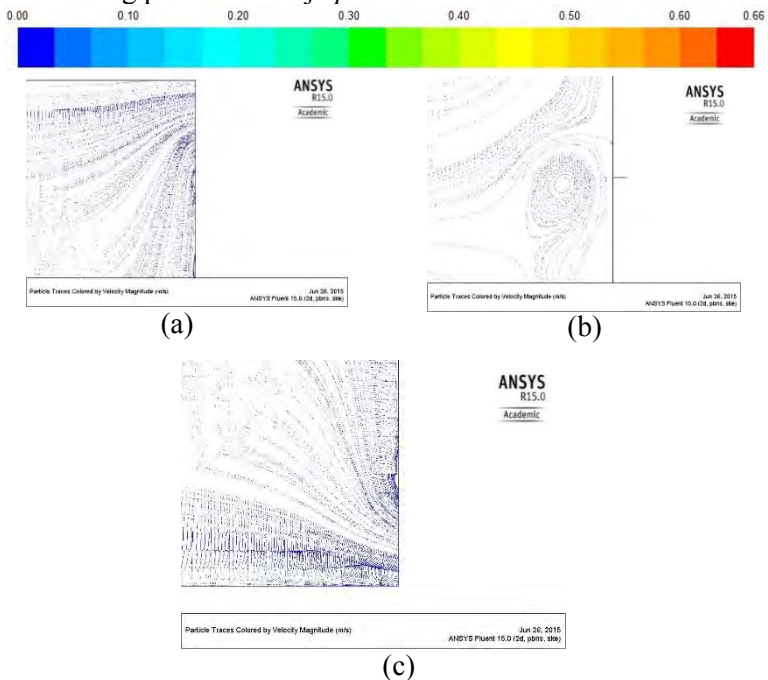


Gambar IV.13 Vektor Fluida dengan Adanya *Outflow* dan Partikel Tanpa Muatan dengan Bagian : (a) *Overall*; (b) *Outflow Atas*; (c) *Dekat Pore*; (d) *Outflow Bawah*

Dapat terlihat dari gambar IV.13 di atas yaitu gambar vektor fluida dengan N_{re} 3500 (kondisi eksperimen) dengan ukuran partikel adalah 7.6×10^{-5} mm dan terdapat 1 *pore* di pusat *chamber*. Apabila terdapat *outflow* pada *chamber* deposisi, seluruh fluida memiliki arah keluar ke arah *outflow* dan kondisi fluida pada dekat *pore*, tidak mengarah ke *pore* melainkan terjadi pusaran dan arah

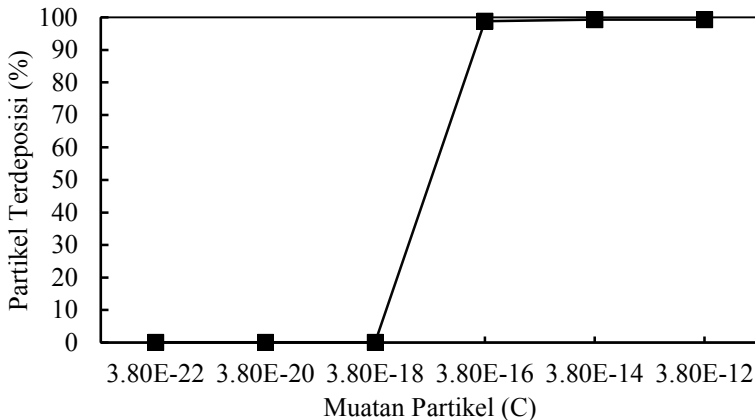
vektor ke *outflow* bagian atas dan bawah. Hasil jumlah partikel yang terdeposisi adalah 0 dan seluruh partikel keluar melalui *outflow*.

Seperti penjelasan pada sub bab IV.4 dimana gerakan partikel mengikuti gerak fluida karena *volume fraction* partikel yang sangat kecil. Sehingga gerakan partikel pada kondisi dengan adanya outflow juga mengikuti gerak fluida seperti yang terlihat pada tabel IV.8. Untuk dapat mendeposisikan partikel ke *pore* pada kondisi *chamber* seperti ini digunakan gaya electric untuk mendorong partikel menuju *pore*



Gambar IV.14 Gerak Partikel dengan Adanya *Outflow* dan Partikel Tanpa Muatan dengan Bagian : (a) *Outflow Atas*; (b) *Dekat Pore*; (c) *Outflow Bawah*

Pada simulasi, gaya elektrik yang diberikan adalah gaya coulomb dan variabel muatan pada partikel yaitu 3.8×10^{-12} C, 3.8×10^{-14} C (data eksperimen), 3.8×10^{-16} C, 3.8×10^{-18} C, 3.8×10^{-20} C, dan 3.8×10^{-22} C. Untuk UDF yang digunakan terdapat pada Lampiran..

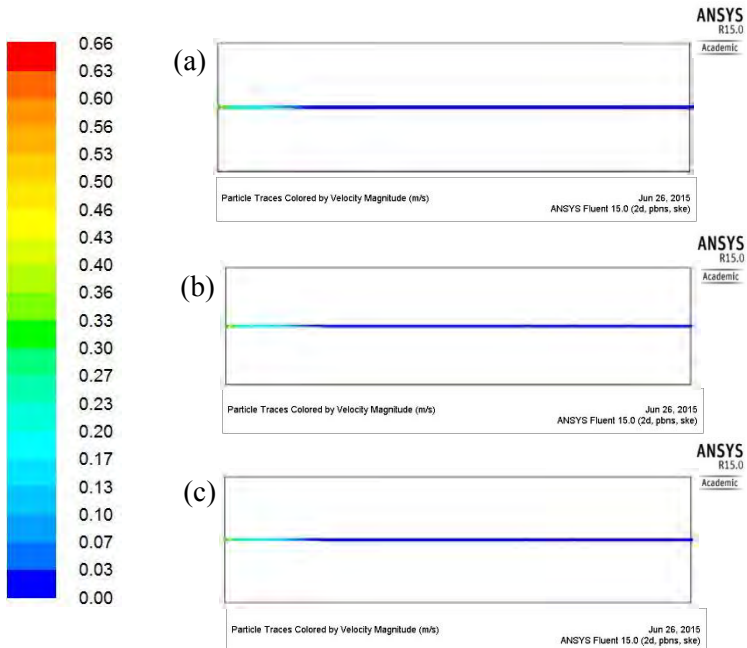


Gambar IV.15 Pengaruh Muatan pada Partikel Terhadap Jumlah Partikel Terdeposisi

Pada saat partikel tidak diberikan muatan seperti yang terlihat pada gambar IV.14, tidak ada partikel yang terdeposisi pada *pore*, pada saat *pore* diberikan *charges* sebesar -3.8×10^{-14} C dan partikel diberikan muatan sebesar 3.8×10^{-22} C sampai 3.8×10^{-18} C jumlah partikel yang terdeposisi hanya berjumlah 1. Dan gerakan partikel masih mengikuti gerak fluida seperti gambar IV.14.

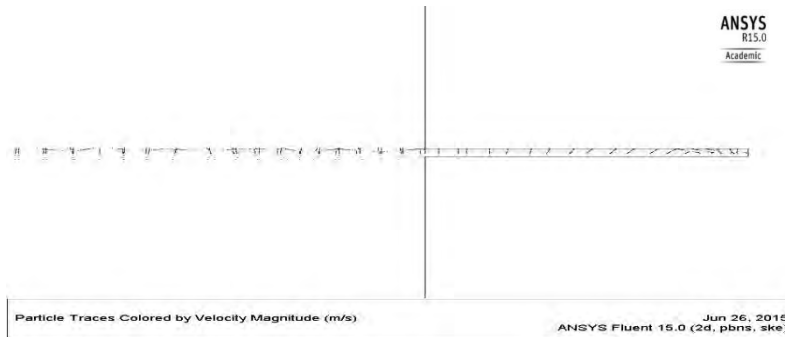
Ketika muatan pada partikel semakin dinaikkan yaitu berjumlah 3.8×10^{-16} C jumlah partikel terdeposisi naik menjadi 988, atau hampir 98.8% dari partikel yang diinjeksikan. Dan gerakan partikel tidak mengikuti gerak fluida, namun mengikuti garis elektrik yang bergerak lurus menuju *pore*. Saat muatan dinaikkan kembali menjadi 3.8×10^{-14} C sampai 3.8×10^{-12} C jumlah

partikel yang terdeposisi naik kembali menjadi 993 atau 93.3%, dan setelah itu tetap konstan di angka 993.

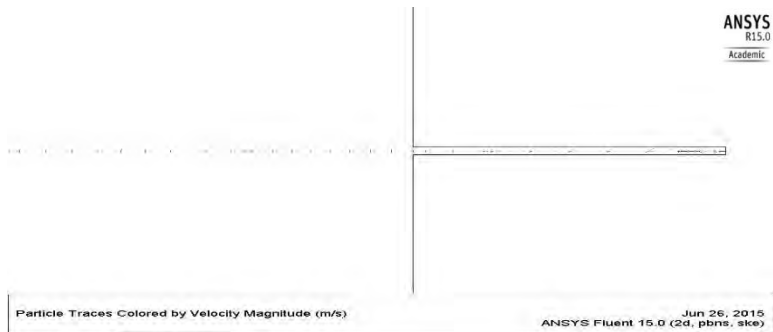


Gambar IV.16 Gerak Partikel untuk Muatan Partikel :
(a) 3.8×10^{-16} C; (b) 3.8×10^{-14} C; (c) 3.8×10^{-12} C

Dari gambar IV.16 di atas, secara *overall* tidak terlihat perbedaan antara *charged* pada partikel namun apabila dibandingkan dengan tanpa *charged* akan sangat terlihat dimana saat diberikan *charged*, partikel dapat fokus pada *pore* dan efisiensi deposisi mencapai diatas 98 %, bahkan lebih baik dari kondisi saat chamber tertutup.



Gambar IV.17 Gerak Partikel di *Pore* untuk Muatan Partikel Sebesar 3.8×10^{-16} C



Gambar IV.18 Gerak Partikel di *Pore* untuk Muatan Partikel Sebesar 3.8×10^{-14} C

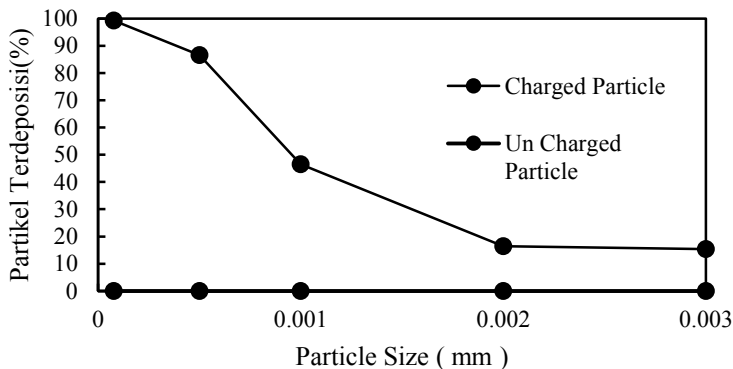
Seperti yang terlihat pada gambar IV.17, jumlah partikel yang terdeposisi berjumlah 988. Apabila dibandingkan dengan gambar IV.18, maka gerak partikel masih lebih sedikit tersebar dibanding dengan gambar IV.18 sehingga jumlah partikel yang terdeposisi pada pore adalah 988, *escaped* berjumlah 8 (partikel pada *substrate* datar) dan *outflow* berjumlah 4 partikel. Sedangkan saat charged 3.8×10^{-14} C jumlah partikel terdeposisi pada pore adalah 993 dan escape 7 dan tidak ada partikel yang keluar melalui *outflow*.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa perbedaan *charged* pada partikel dapat membuat partikel terdepositasi dengan efisiensi tinggi sekalipun diberikan tempat keluaran fluida. Sehingga apabila dilakukan secara injeksi partikel dan fluida secara continuous akan sangat baik dan semakin banyak partikel yang dapat terdepositasi pada pore. Jumlah *charged* paling optimum pada partikel adalah sebesar 3.8×10^{-14} C.

IV.7 Pengaruh Ukuran *Charged* Partikel pada Deposisi Partikel

Setelah didapat hasil pada pembahasan IV.6 bahwa partikel dapat terdepositasi pada pore apabila memiliki muatan lebih besar dari 3.8×10^{-16} C, dimana deposisi partikel terbanyak adalah saat kondisi N_{Re} 3500, ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm dan dengan *charged* pada partikel sebesar 3.8×10^{-14} C.

Ukuran partikel memiliki pengaruh yang cukup besar pada deposisi partikel. Pada simulasi selanjutnya dilakukan variasi terhadap ukuran partikel yaitu 7.6×10^{-5} mm, 5.0×10^{-4} mm, 1.0×10^{-3} mm, 2.0×10^{-3} mm, dan 3.0×10^{-3} mm. Dan variabel yang ditetapkan adalah *charged* pada partikel sebesar 3.8×10^{-14} C dan N_{Re} Fluida 3500.



Gambar IV.19 Pengaruh Ukuran *Charged* Partikel pada Deposisi Partikel

Seperti yang terlihat pada gambar IV.19, semakin besar partikel, jumlah partikel yang terdeposisi semakin menurun. Hal ini disebabkan oleh menurunnya nilai *surface charge density* dengan semakin naiknya ukuran partikel. Berikut ini pada Tabel IV.1 adalah jumlah *charged density* masing-masing ukuran partikel.

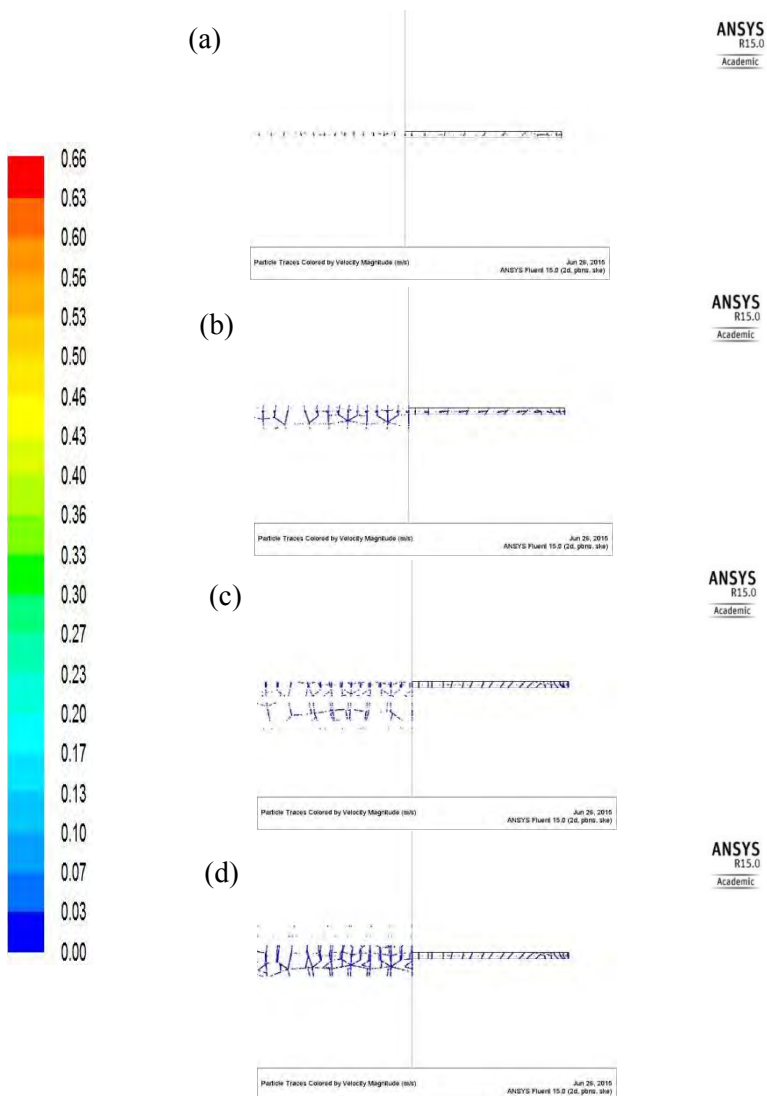
Tabel IV.1 *Charged Density* pada Tiap Ukuran Partikel.

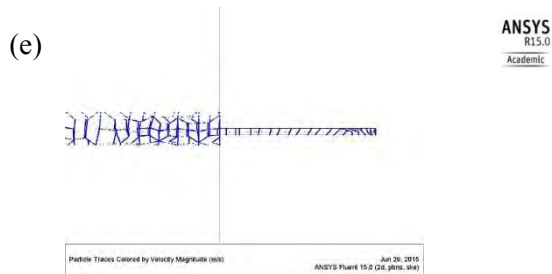
Ukuran Partikel (mm)	<i>Surface Charged Density</i> (C/m ²)
7.6×10^{-5}	2.095
5.0×10^{-4}	0.048
1.0×10^{-3}	0.012
2.0×10^{-3}	0.003
3.0×10^{-3}	0.001

Apabila *surface charged density* pada partikel menurun, maka partikel akan sedikit mengikuti gerak fluida dan membuat partikel mulai tidak mengikuti arah electric field karena nilai electric field yang menurun berdasarkan persamaan Gauss. Pada persamaan Gauss nilai *electric field* akan turun apabila charged density pada partikel menurun. Sehingga partikel yang terdeposisi akan semakin menurun. (Yao,2009)

Pada Gambar IV.20 juga dapat dilihat gerakan partikel menuju pore, dimana keseluruhan ukuran partikel memiliki charged yang sama besar, sama sama memiliki gerakan yang mirip. Dapat terlihat pula semakin besar ukuran partikel semakin banyak partikel yang terdeposisi tidak pada pore. Gerakan partikel semakin melebar dari lebar pore. Ketika ukuran partikel 0.001 dan semakin besar dapat terlihat juga bahwa lebar pore ditutupi partikel karena ukuran yang semakin membesar, sehingga jumlah partikel terdeposisi semakin menurun.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar ukuran partikel, jumlah partikel terdeposisi akan semakin menurun karena *charged density* yang menurun dan *pore* yang semakin tertutup karena partikel yang cukup besar.

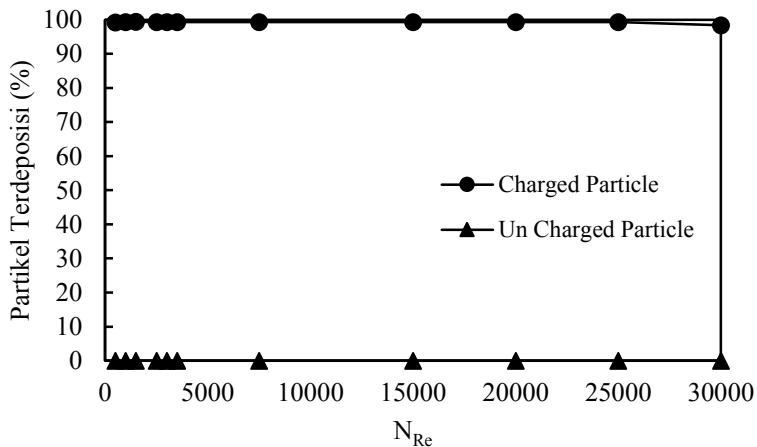




Gambar IV.20 Gerak Partikel untuk Ukuran Partikel:
 (a) 7.6×10^{-5} mm; (b) 5.0×10^{-4} mm; (c) 1.0×10^{-3} mm;
 (d) 2.0×10^{-3} mm; (e) 3.0×10^{-3} mm

IV.8 Pengaruh N_{Re} Fluida pada Deposisi *Charged Particle*

Setelah didapatkan charged optimum, dan ukuran partikel optimum, maka selanjutnya akan disimulasikan perbedaan kondisi fluida pada deposisi charged particle. Variabel yang digunakan adalah N_{Re} 500, 1000, 1500, 2500, 3000, 3500, 7500, 15000, 20000, 25000, dan 30000. Untuk variabel yang ditetapkan adalah charged pada particle yaitu 3.8×10^{-14} C, ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm.

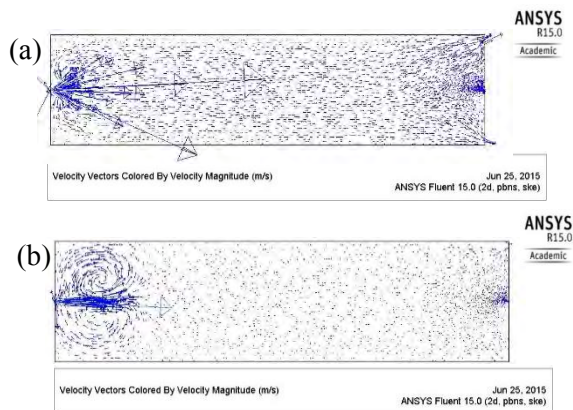


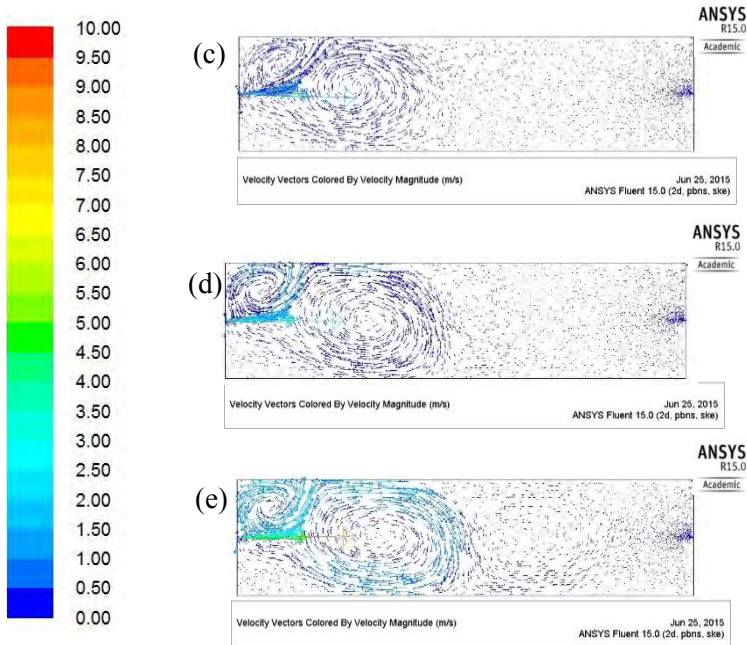
Gambar IV.21 Pengaruh Aliran Fluida pada Deposisi Partikel

Pada Gambar IV.21 dapat dilihat pada saat N_{Re} berada pada kondisi laminar deposisi *charged particle* terus naik hingga N_{Re} 1500 (kondisi laminar), dan setelah itu sedikit turun dan konstan, lalu pada N_{Re} 30000 turun menjadi 984 partikel.

Ketika partikel sudah diberikan muatan dan terdapat tempat keluaran fluida, dapat terlihat bahwa kondisi laminar adalah kondisi terbaik untuk deposisi *charged particle*. Dimana mencapai jumlah 994 pada saat N_{Re} 1500, ini adalah jumlah partikel terdeposisi yang paling banyak diantara kondisi manapun. Pada saat aliran transisi hingga turbulen N_{Re} 25000 jumlah partikel terdeposisi masih konstan, dan baru turun saat N_{Re} 30000. (Kusdianto, 2014)

Apabila dilihat selisih antara jumlah partikel terbanyak dan paling sedikit yang hanya memiliki selisih 10 partikel maka dapat disimpulkan bahwa kondisi fluida hanya sedikit mempengaruhi jumlah partikel terdeposisi, karena gaya electric yang memiliki peran sangat dominan pada *charged particle*.





Gambar IV.22 Vektor Fluida pada *Chamber* untuk N_{Re} :
 (a) 1500; (b) 3500; (c) 7500; (d) 15000; (e) 30000

Dari Gambar IV.22 dapat dilihat pada saat N_{Re} 1500 vorteks yang terbentuk sangat kecil, dan luas vorteks di dekat *pore* juga masih kecil, namun apabila semakin cepat aliran fluida, vorteks yang terbentuk semakin membesar baik pada sisi *inlet jet* ataupun di dekat *pore*. Sehingga dapat dijelaskan bahwa semakin kecil vorteks yang terbentuk dan aliran fluida yang semakin tenang, maka jumlah partikel yang dapat terdeposisi akan semakin banyak, karena gaya elektrik yang diperlukan akan lebih sedikit untuk melawan aliran fluida.

BAB V PENUTUP

V.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Untuk proses deposisi partikel sebelum diberi muatan, keadaan optimum adalah saat diameter partikel 7.6×10^{-5} mm untuk ukuran *pore* $5.5 \mu\text{m}$ dan fluida memiliki N_{Re} 7500.
2. Semakin banyak jumlah *pore*, jumlah partikel terdeposisi semakin menurun. Hal ini dikarenakan letak antar *pore* yang terpisah dengan jarak yang sama, sebaiknya *pore* diletakkan saling berdekatan dan berada di pusat *chamber* sehingga jumlah partikel yang terdeposisi semakin banyak.
3. Untuk proses deposisi partikel bermuatan, jumlah muatan optimum adalah 3.8×10^{-14} C, diameter partikel 7.6×10^{-5} mm, dan fluida memiliki N_{Re} 1500.
4. Pada keadaan partikel yang bermuatan, semakin besar ukuran partikel, jumlah partikel terdeposisi akan semakin menurun karena *charged density* yang menurun dan *pore* yang semakin tertutup karena partikel yang cukup besar

V.2 Saran

Dari jalannya percobaan yang telah dilakukan, dapat disarankan untuk peneliti selanjutnya:

1. Melakukan penelitian ini dengan jumlah *pore* yang lebih banyak dengan jarak yang dekat antar *pore*-nya.
2. Menuliskan rumus *image force* dan gaya dipol untuk UDF.
3. Permodelan 2D ini dapat dikembangkan menjadi 3D untuk dapat mengetahui kondisi aliran di beberapa bidang pengamatan dan diberikan perpanjangan *outflow* agar dapat mengetahui kondisi fluida saat *outflow*

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

APPENDIKS

A.1. N_{Re} Fluida *Carrier Phase*

Pada simulasi ini, digunakan variasi N_{Re} untuk aliran laminar, transisi, dan turbulen untuk mengetahui bagaimana hubungan antara N_{Re} fluida dengan jumlah partikel yang terdeposisi. Dimana rumus N_{Re} adalah sebagai berikut:

$$N_{Re} = \frac{\rho \times D \times v}{\mu} \dots\dots\dots(1)$$

dengan D = diameter ekivalen *chamber*

ρ = densitas fluida

μ = viskositas fluida

v = kecepatan fluida

Pada kondisi simulasi ini ($P = 1 \text{ atm}$, $T = 373 \text{ K}$) dengan fluida adalah CO_2 , digunakan data sebagai berikut:

$$D = 25 \text{ mm} = 0.025 \text{ m}$$

$$\rho = 1.7878 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1.37 \times 10^{-5}$$

N_{Re} yang digunakan pada simulasi ini ditetapkan sehingga mencakupi untuk aliran laminar, transisi, dan turbulen. Sehingga kecepatan fluida yang digunakan dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

$$v = \frac{N_{Re} \times \mu}{\rho \times D} \dots\dots\dots(2)$$

Diambil contoh dengan $N_{Re} 500$, maka $v = \frac{N_{Re} \times \mu}{\rho \times D}$

$$v = \frac{N_{Re} \times \mu}{\rho \times D}$$

$$v = \frac{500 \times 1.37 \times 10^{-5}}{1.7878 \times 0.025}$$

$$v = 0.1533 \text{ m/s}$$

Untuk hasil perhitungan kecepatan fluida dengan variasi N_{Re} disajikan pada Tabel A.1

Tabel A.1 Hasil Perhitungan Kecepatan Fluida

N _{Re}	v (m/s)	N _{Re}	v (m/s)
500	0.1533	7500	2.2989
1000	0.3065	15000	4.5978
1500	0.4598	20000	6.1304
2500	0.7663	25000	7.6630
3000	0.9196	30000	9.1957
3500	1.0728		

A.2. Volume Fraction Partikel pada Fluida Carrier Phase.

Data yang digunakan pada simulasi ini adalah sebagai berikut:

Diameter Partikel : 76 nm = 0.000076 mm

Jumlah Partikel : 1000

Panjang *Chamber*: 100 mm

Lebar *Chamber* : 25 mm

Partikel diasumsikan *monodisperse* dimana memiliki bentuk *spherical* dan seragam. Sehingga perhitungan volume partikel menggunakan perhitungan volume bola, dimana rumus volume bola adalah sebagai berikut:

$$V_{\text{bola}} = \frac{4}{3} \pi r^3 \dots\dots\dots(3)$$

Untuk volume 1000 partikel, persamaan (3) menjadi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V_{1000 \text{ partikel}} &= \frac{4}{3} \pi r^3 \times 1000 \\
 &= \frac{4}{3} \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^3 \times 1000 \\
 &= \frac{4}{3} \pi \times \frac{D^3}{8} \times 1000 \\
 V_{1000 \text{ partikel}} &= \frac{1}{6} \pi D^3 \times 1000 \dots\dots\dots(4) \\
 &= \frac{1}{6} \pi \times 0.000076^3 \times 1000 \\
 &= 2.29 \times 10^{-10} \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

Sedangkan untuk volume *chamber* digunakan perhitungan volume silinder. Karena pada eksperimen menggunakan pipa silinder. Dimana rumus untuk volume silinder adalah sebagai berikut:

$$V_{\text{silinder}} = \pi \times r^2 \times t \dots\dots\dots(5)$$

Dimana untuk kondisi *chamber*, r adalah ½ dari lebar *chamber*, dan t adalah panjang *chamber*.

$$\begin{aligned} V_{\text{chamber}} &= \pi \times 12.5^2 \times 100 \\ &= 49062.5 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Sehingga *Volume Fraction* setiap ukuran Partikel adalah :

$$\text{Volume Fraction} = \frac{\text{Volume 1000 partikel}}{\text{Volume Chamber}}$$

Tabel A.2 %Fraksi Tiap Ukuran Partikel

Ukuran Partikel (mm)	Volume 1000 partikel (mm ³)	<i>Volume Fraction</i>	% Fraksi
7.6×10^{-5}	2.0×10^{-10}	5.0×10^{-15}	5.0×10^{-13}
5.0×10^{-4}	6.5×10^{-8}	1.3×10^{-12}	1.3×10^{-10}
1.0×10^{-3}	5.2×10^{-7}	1.1×10^{-11}	1.3×10^{-9}
2.0×10^{-3}	4.2×10^{-6}	8.5×10^{-11}	8.5×10^{-9}
3.0×10^{-3}	1.4×10^{-5}	2.9×10^{-10}	2.9×10^{-8}

A.3. Jumlah Maksimum Partikel Dapat Terdeposisi dalam *Pore*.

Pada ukuran *pore* tertentu terdapat jumlah partikel terbanyak yang dapat terdeposisi. Dimana dihitung melalui volume *pore* dibagi dengan volume partikel.

Diketahui :

$$\begin{aligned} \text{Diameter } \textit{pore} \text{ (d)} &: 0.0055 \text{ mm} \\ \text{Kedalaman } \textit{pore} \text{ (t)} &: 0.13 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume Pore} &= \phi \times r^2 \times t \\ &= 3.14 \times \left(\frac{0.0055}{2} \right)^2 \times 0.13 \\ &= 0.00000309 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Tabel A.3 Jumlah Partikel Terdeposisi Maksimum

Ukuran Partikel (mm)	Volume partikel (mm ³)	<i>Volume Pore</i> (mm ³)	Jumlah Partikel Maksimum
7.6×10^{-5}	2×10^{-13}	3.09×10^{-6}	15450000
5.0×10^{-4}	6.54×10^{-11}	3.09×10^{-6}	47247
1.0×10^{-3}	5.23×10^{-10}	3.09×10^{-6}	5904
2.0×10^{-3}	4.18×10^{-9}	3.09×10^{-6}	738
3.0×10^{-3}	1.4×10^{-8}	3.09×10^{-6}	218

A.4. Ukuran Partikel Optimum yang Dapat Terdeposisi.

Ukuran partikel optimum yang dapat terdeposisi diartikan sebagai jumlah partikel yang terdeposisi pada setiap kondisi fluida dimana belum terjadi penurunan yang signifikan terhadap jumlah partikel terdeposisi di setiap ukuran partikel yang berbeda.

Untuk kondisi fluida laminar, sampel N_{Re} yang diambil adalah dengan N_{Re} 1500.

Tabel A.4 Jumlah Partikel Terdeposisi untuk N_{Re} 1500

Ukuran Partikel (mm)	Jumlah Partikel Terdeposisi (#)
7.6×10^{-5}	260
5.0×10^{-4}	253
1.0×10^{-3}	241
2.0×10^{-3}	221
3.0×10^{-3}	189

Pada tabel di atas dapat dilihat keseluruhan ukuran partikel masih optimum atau belum terdapat penurunan yang signifikan sehingga persentase ukuran partikel per ukuran *pore* adalah :

$$= \frac{0.003}{0.0055} \times 100 \% = 54 \%$$

Untuk kondisi fluida transisi, sampel N_{Re} yang diambil adalah dengan N_{Re} 3500.

Tabel A.5 Jumlah Partikel Terdeposisi untuk N_{Re} 3500

Ukuran Partikel (mm)	Jumlah Partikel Terdeposisi (#)
7.6×10^{-5}	335
5.0×10^{-4}	325
1.0×10^{-3}	325
2.0×10^{-3}	212
3.0×10^{-3}	44

Pada tabel diatas dapat dilihat ukuran partikel optimum pada 0.002 mm sehingga persentase ukuran partikel per ukuran *pore* adalah

$$= \frac{0.002}{0.0055} \times 100 \% = 36 \%$$

Untuk kondisi fluida turbulen, sampel N_{Re} yang diambil adalah dengan N_{Re} 7500.

Tabel A.6 Jumlah Partikel Terdeposisi untuk N_{Re} 7500

Ukuran Partikel (mm)	Jumlah Partikel Terdeposisi (#)
7.6×10^{-5}	417
5.0×10^{-4}	408
1.0×10^{-3}	397
2.0×10^{-3}	49
3.0×10^{-3}	30

Pada tabel diatas dapat dilihat ukuran partikel optimum pada 0.001 mm sehingga persentase ukuran partikel per ukuran *pore* adalah

$$= \frac{0.001}{0.0055} \times 100 \% = 18 \%$$

A.5. *Surface Charged Density* pada Setiap Ukuran Partikel.

Pada perhitungan *charge density* diketahui data sebagai berikut :

1. Ukuran Partikel = 0.000000076 m
2. Charged Partikel = 3×10^{-16} C

$$\begin{aligned}\text{Luas Area} &= 4 \times \pi \times r^2 \\ &= 4 \times 3.14 \times 0.000000076 \text{ m} \\ &= 1.81 \times 10^{-14}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Charge Density} &= \frac{A}{Q} \\ &= \frac{1.81 \times 10^{-14}}{3 \times 10^{-16} \text{ C}} \\ &= 2.095 \text{ C/m}^2\end{aligned}$$

Tabel A.7 *Surface Charged Density* untuk Tiap Ukuran

Ukuran Partikel (m)	<i>Surface Charged Density</i> (C/m ²)
7.6×10^{-8}	2.095
5.0×10^{-7}	0.048
1.0×10^{-6}	0.012
2.0×10^{-6}	0.003
3.0×10^{-6}	0.001

UDF FOR ELECTRIC FORCE

```
#include "udf.h"
#define Q 3.8e-14 /* particle electric charge C*/
#define VM 80000 /* magnetic field strength V/M */
#define TSTART 1e-10 /* field applied at t = tstart S*/
#define WALL_ID_6 -3.8e-14 /* charged at pore */

/* Calculate magnetic force on charged particle. Magnetic */
/* force is particle charge times cross product of particle */
/* velocity with magnetic field:  $F_x = q*b_z*V_y$ ,  $F_y = -q*b_z*V_x$  */

DEFINE_DPM_BODY_FORCE(particle_body_force, p, i)
{
    real bforce;
    if(P_TIME(p)>=TSTART)
    {
        if(i==0) bforce=Q*((-0.0487*(P_POS(p)[0]))+6.4141)*10000)*
        P_VEL(p)[0];
        else if(i==1) bforce=-Q*((-0.0487*(P_POS(p)[1]))+6.4141)*
        10000)*P_VEL(p)[1];
    }
    else
        bforce=0.0;
    /* an acceleration should be returned */
    return (bforce/P_MASS(p));
}
```

Halaman ini Sengaja Dikosongkan



FINAL PROJECT - TK 141581

NUMERICAL SIMULATION OF CHARGED AEROSOL PARTICLE DEPOSITION INTO POROUS STRUCTURE

I Gede Wahyudi Mahendra Putra
NRP 2311100 002
Rosmalia Andini
NRP 2311100 154

Supervisors

Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M. Eng
NIP. 195209161980031002
Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng
NIP. 197612292009121001

CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2015

LEMBAR PENGESAHAN

SIMULASI NUMERIK DEPOSISI CHARGED AEROSOL PARTICLE PADA POROUS STRUCTURE

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Teknik Program Studi S-1
Jurusan Teknik Kimia
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**I GEDE WAHYUDI MAHENDRA P.
ROSMALIA ANDINI**

**2311100002
2311100154**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng
(Pembimbing I)
2. Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng
(Pembimbing II)
3. Prof. Dr. Ir. Mahfud, DEA
(Penguji I)
4. Dr. Tantular Nurtono, S.T., M.Eng
(Penguji II)
5. Dr. Widiyastuti, S.T., M.T
(Penguji III)



**SURABAYA
JULI 2015**

SIMULASI NUMERIK DEPOSISI *CHARGED AEROSOL PARTICLE* PADA *POROUS STRUCTURE*

Nama Mahasiswa : I Gede Wahyudi M.P. (2311100002)
Rosmalia Andini (2311100154)
Jurusan : Teknik Kimia FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng
Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kondisi yang optimum pada deposisi *charged aerosol particle* pada *porous structure* berdasarkan simulasi numerik dengan *software Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan FLUENT dan UDF (*User Defined Function*). Dimensi yang akan digunakan pada CFD ini adalah dengan permodelan 2 dimensi, dimana *wall* memiliki panjang 10 cm dan lebar 2,5 cm. *Cone jet* digunakan sebagai *inlet* dari partikel dan *porous structure* sebagai substrat. Analisa yang dilakukan meliputi pola gerakan partikel, kecepatan gerakan partikel, dan jumlah partikel pada *porous structure*. Variabel yang ditetapkan pada permodelan ini adalah jarak partikel dengan substrat dan diameter *pore* dari substrat. Sedangkan ukuran partikel, kecepatan fluida, dan muatan pada partikel divariasikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin kecil partikel yang digunakan maka semakin optimum deposisi yang terjadi. Deposisi yang optimum juga terjadi jika aliran fluidanya dalam kondisi memiliki N_{Re} sebesar 7.500. Pada saat partikel diberikan muatan, deposisi yang optimum terjadi ketika partikel diberikan muatan sebesar $3,8 \times 10^{-14}$ C dengan aliran fluida memiliki N_{Re} 1.500, dan ukuran partikel 76 nm

Kata kunci : *Charged particle, Porous Structure, Deposisi, CFD.*



Halaman ini Sengaja Dikosongkan

NUMERICAL SIMULATION OF CHARGED AEROSOL PARTICLE DEPOSITION INTO POROUS STRUCTURE

Name of Student : I Gede Wahyudi M.P (2311100002)
Rosmalia Andini (2311100154)
Department : Chemical Engineering FTI-ITS
Advisor : Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng
Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng

ABSTRACT

This research was committed to study deposition process of charged aerosol particle into porous structure based on CFD numerical simulation using FLUENT and UDF (User Defined Function). CFD modelling used in this research was 2 dimension, which had 10 cm length and 2,5 cm width as wall. Cone jet was used as inlet of the particles and porous structure as a substrate. This study through electric on particle, particle trajectory, particle distribution, flow velocity, and number of particles in the porous structure. The variables adjusted were the distance between particle and substrate, and the pore diameter of substrate. While the manipulated variables were diameter of particle, number of pore, velocity of fluid, and charges of particle. The result showed that the smaller particle size, the optimum deposition occurred. The optimum deposition also occurred when the fluid had N_{Re} 7.500. When the particles were given a charge, the optimum deposition when the particle charge was $3,8 \times 10^{-14}$ C, with the N_{Re} of fluid was 1.500, and particle size was 76nm

Keywords: *Charged particle, Porous structure, Deposition, CFD.*



Halaman ini Sengaja Dikosongkan

KATA PENGANTAR


Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah SWT. yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan laporan Skripsi kami yang berjudul:

” Simulasi Numerik Deposisi *Charged Aerosol Particle* pada *Porous Structure*”

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi program S-1 di Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Penulis menyadari dalam penyusunan Skripsi ini tidak akan selesai tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini kami ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua serta saudara-saudara kami yang selalu memberikan kasih sayang tulus, motivasi, bimbingan, dan doa yang selalu tercurah selama ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng selaku Dosen Pembimbing dan Kepala Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran, Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS, atas bimbingan, saran, dan motivasi yang diberikan.
3. Bapak Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng. selaku Dosen Pembimbing, atas bimbingan, saran, dan motivasi yang diberikan.
4. Bapak dan Ibu Dosen serta Karyawan Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran Jurusan Teknik Kimia FTI – ITS Surabaya yang telah memberikan ilmu dan bimbingan kepada penulis.
5. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Kimia FTI – ITS Surabaya yang telah memberikan ilmu serta bimbingannya selama kami kuliah.
6. Bapak Setiyo Gunawan, S.T., Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Jurusan Teknik Kimia FTI – ITS Surabaya.

- 
7. Yusi, Icha, Ardianto, Gin Gin Rika, Faning, Rosi, Stephen, Azis, Hermawan, Laila, Ni'am, Juwi, Drajat, Dimas, Della, Wulan, Rina, Diana, Lia, Upik, Sarah, Lemon, Audit, Ridho dan Raga sebagai rekan-rekan seperjuangan di Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran atas semangat dan motivasinya.
 8. Seluruh civitas akademika Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS yang telah memberikan dukungan moril kepada penulis.
 9. Keluarga besar Teknik Kimia Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), khususnya teman-teman di Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS atas semua dukungan, semangat, serta kerjasamanya.
 10. Serta semua pihak lainnya yang tidak bisa disebutkan penulis satu persatu yang telah membantu penulis selama penulisan laporan

Penulis menyadari laporan skripsi ini tidak luput dari berbagai kekurangan, untuk itu penulis mengharapkan saran dan kritik demi kesempurnaan dan perbaikannya. Semoga skripsi ini dapat berguna di kemudian hari.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK (INDONESIA)	i
ABSTRAK (ENGLISH)	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Perumusan Masalah	3
I.3 Batasan Masalah.....	3
I.4 Tujuan Penelitian	3
I.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
II.1 Deposisi Partikel	5
II.1.1 Deposisi Fase <i>Liquid</i>	5
II.1.2 Deposisi Fase Gas	6
II.2 <i>Porous Structure</i>	7
II.3 <i>Charged Particle</i>	8
II.4 <i>Particle Tracking</i>	8
II.4.1 <i>Eulerian Particle Tracking</i>	9
II.4.2 <i>Langrangin Particle Tracking</i>	9
II.5 Metodologi <i>Particle Tracking</i> pada CFD.....	11
II.5.1 <i>Discrete Phase</i>	11
II.6 Model Deposisi Partikel	12
II.6.1 <i>Particle Sticking</i>	15
II.7 CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>).....	16
II.7.1 Persamaan Transport Senyawa.....	18
II.7.2 Permodelan untuk Turbulensi	18
II.7.3 <i>Discrete Phase Model</i>	20
II.7.4 <i>Stochastic Tracking</i>	20
II.7.5 Kondisi Batas Untuk <i>Wall</i>	20

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Sistem yang Dipelajari	23
III.2 Kondisi Batas	24
III.3 Prosedur Penelitian untuk Permodelan.....	24
III.4 Variabel Penelitian	27

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Proses Deposisi dan Pemilihan Model pada CFD	29
IV.2 Validasi Hasil Eksperimen dengan Simulasi.....	30
IV.3 Ukuran Partikel Optimum pada Deposisi Partikel	31
IV.4 Kondisi <i>Carrier Phase</i> Fluida Optimum pada Deposisi Partikel.....	37
IV.5 Pengaruh Jumlah <i>Pore</i> terhadap Deposisi Partikel	43
IV.6 Pengaruh <i>Electric Force</i> pada Deposisi Partikel	45
IV.7 Pengaruh Ukuran <i>Charged</i> Partikel pada Deposisi Partikel	53
IV.8 Pengaruh N_{Re} Fluida pada Deposisi <i>Charged</i> <i>Particle</i>	56

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan.....	59
V.2 Saran.....	59

DAFTAR NOTASI	xiii
----------------------------	-------------

DAFTAR PUSTAKA	xv
-----------------------------	-----------

APPENDIKS	A-1
------------------------	------------

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

Tabel IV.1 *Charged Density* pada Tiap Ukuran Partikel... 54



Halaman ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar II.1	Ilustrasi Pembentukan AAO.....	8
Gambar II.2	Ilustrasi Gerak <i>Charged Particle</i>	14
Gambar II.3	Gaya yang Terjadi pada Adhesi Partikel pada Permukaan	15
Gambar II.4	Kondisi Batas untuk Permodelan <i>Wall</i>	21
Gambar III.1	Dimensi Simulasi <i>Charged Particle Deposition</i>	23
Gambar III.2	Flowchart Simulasi pada Simulasi Deposisi <i>Charged Particle</i>	26
Gambar IV.1	Grafik Validasi Hasil Eksperimen dan Simulasi	31
Gambar IV.2	Pengaruh Diameter Partikel pada Range N_{Re} 500-3500.....	32
Gambar IV.3	Pengaruh Diameter Partikel pada Range N_{Re} 7500-30000.....	33
Gambar IV.4	Gerak Partikel untuk Ukuran Partikel 7.6×10^{-5} mm.....	34
Gambar IV.5	Gerak Partikel untuk Ukuran Partikel 3.0×10^{-5} mm.....	36
Gambar IV.6	Vektor Fluida untuk Ukuran Partikel 7.6×10^{-5} mm.....	40
Gambar IV.7	Vektor Fluida pada N_{Re} 1500.....	41
Gambar IV.8	Vektor Fluida pada N_{Re} 7500.....	42
Gambar IV.9	Pengaruh Jumlah <i>Pore</i> Terhadap Jumlah Partikel Terdeposisi	43
Gambar IV.10	Gerak Partikel pada Jumlah <i>Pore</i> Berbeda	44
Gambar IV.11	Hasil Simulasi dengan COMSOL Mengenai <i>Electric Field Strength</i> pada Setiap Titik di Satu <i>Pore</i>	46
Gambar IV.12	Nilai <i>Electric Field</i> pada Tiap Titik Hasil Simulasi COMSOL.....	47
Gambar IV.13	Vektor Fluida dengan Adanya Outflow dan Partikel Tanpa Muatan.....	48

Gambar IV.14 Gerak Partikel dengan Adanya Outflow dan Partikel Tanpa Muatan.....	49
Gambar IV.15 Pengaruh Muatan pada Partikel Terhadap Jumlah Partikel Terdeposisi	50
Gambar IV.16 Gerak Partikel untuk Beda Muatan Partikel	51
Gambar IV.17 Gerak Partikel di <i>Pore</i> untuk Muatan Partikel Sebesar 3.8×10^{-16} C.....	52
Gambar IV.18 Gerak Partikel di <i>Pore</i> untuk Muatan Partikel Sebesar 3.8×10^{-14} C.....	52
Gambar IV.19 Pengaruh Ukuran <i>Charged</i> Partikel pada Deposisi Partikel	53
Gambar IV.20 Gerak Partikel untuk Beda Ukuran Partikel.....	56
Gambar IV.21 Pengaruh Aliran Fluida pada Deposisi Partikel.....	56
Gambar IV.22 Vektor Fluida pada <i>Chamber</i> untuk setiap N_{Re}	58

DAFTAR NOTASI

NOTASI	KETERANGAN	SATUAN
C_d	<i>Coefficient Drag</i>	[...]
d_p	<i>Particle diameter</i>	m
F_D	<i>Drag force on particle</i>	N
k	<i>Energy kinetic turbulent</i>	m^2/s^2
m_p	<i>Mass of particle</i>	kg
Re_p	<i>Reynolds number of the particle</i>	[...]
S	<i>Ratio of particle density to fluid density</i>	[...]
t	<i>Time</i>	s
T	<i>Gas temperature</i>	K
T_p	<i>Particle temperature</i>	K
u	<i>Fluid velocity</i>	m/s
u_j	<i>Instantaneous fluid velocity</i>	m/s
u_p	<i>Particle velocity</i>	m/s
u_{tc}	<i>Critical wall shear velocity</i>	m/s
v_{cr}	<i>Capture velocity</i>	m/s
v_n	<i>Normal velocity</i>	m/s
ε	<i>Turbulent dissipation rate</i>	m^2/s^3
μ	<i>Dynamic viscosity of fluid</i>	Kg/m.s
ν	<i>Kinematic viscosity</i>	M2/s
ν_p	<i>Poisson ratio of particle material</i>	[...]
ν_s	<i>Poisson ratio of surfaces material</i>	[...]
ω	<i>Specific dissipation rate</i>	s^{-1}
ρ	<i>Density of fluid</i>	Kg/m3
ρ_p	<i>Density of particle</i>	Kg/m3

τ_{12}	<i>Particle relaxation time</i>	s
τ_w	<i>Wall shear stress</i>	Pa
A	luas permukaan	m ²
\vec{F}	Additional acceleration term	Force/unit particle mass
g	Konstanta gravitasi	m/s ²
n	Jumah Droplet dalam 1 cell	[...]
P	Pressure	Pa
Pr	Prandtl number	[...]
Re	Reynold Number	[...]
S _k	User defined source Term	[...]
ε	dissipation rate dari energi kinetik turbulen	m ² /s ³
ε_p	emisivitas partikel	[...]
σ	konstanta Stefan-Boltzmann (5,67 x 10 ⁻⁸)	W/m ² -K ⁴
η	Effectiveness factor	[...]
θ_R	Temperatur radiasi	K
δ_{ij}	Kronecker delta	[...]

DAFTAR PUSTAKA

- Besra, L., Uchikoshi, T., Suzuki, S., dan Sakka, Y. 2008. "Bubble-free aqueous electrophoretic deposition (EPD) by pulse-potential application". *Journal of the American Ceramic Society*, 91, 3154-3159.
- Bogart, T.E., Dey, S., Lew, K. K., Mohnet, S. E., dan Redwing, J. M. 2005. "Diameter-controlled synthesis of silicon nanowires using nanoporous alumina membranes". *Advanced Materials*, 17, 114-117.
- Brach, R. dan Dunn, P. 1992. "A mathematical model of the impact and adhesion of microspheres". *Aerosol Science and Technology*, 16, 51-64.
- Dehbi, A. 2008. "A CFD model for particle dispersion in turbulent boundary layer flows". *Nuclear Engineering*, 238, 707-715.
- Friedlander, S.K. dan Johnstone, H.F. 1957. "Deposition of Suspended Particles from Turbulent Gas Streams". *Industry of Chemical Engineering*, 49, 1151-1157.
- Guha, A. 2008. "Transport and deposition of particles in turbulent and laminar flow". *Fluid Mechanical*, 40, 311-41.
- Haber, S. 1996. "Deep electrophoretic penetration and deposition of ceramic particles inside impermeable porous substrates". *Journal of Colloid and Interface Science*, 179, 380-390.
- Hereidal, M. L. 2010. *Particle Dynamics in Monolithic Catalyst*. Ph. D Thesis Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering: Tidak Diterbitkan
- Hinds, W. C. 1999. *Aerosol Technology. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles 2nd edition*. New York: John Wiley & Sons.
- Ishikawa, Y. dan Matsumoto, Y. 2001. "Elektrodeposition of TiO₂ photocatalyst into nano-pores of hard alumite". *Electrochimica Acta*, 46, 2819-2824.
- Jani, A.M.M., Losic, D., dan Voelcker, N. H. 2013. "Nanoporous anodic aluminium oxide; Advances in surface engineering and

emerging applications". *Progress in Materials Science*, 58, 636-704.

Johansson, E. M. 2010. *Controlling the Pore Size and Morphology of Mesoporous Silica*. Thesis Doktor Linkoping University Swedia Department of Physics, Chemistry, and Biology: Tidak Diterbitkan.

Kamada, K., Tokotumi, M., Enomoto, N., dan Hojo, J. 2005. "Incorporation of oxide nanoparticles into barrier-type alumina film via anodic oxidation combined with electrophoretic deposition". *Journal of Materials Chemistry*, 15, 3388-3394.

Kladas, D. D. 1993. *Turbine Cascade Optimization Against Particle Deposition*. Ph. D. Thesis University of Patras Department of Mechanical Engineering.

Kusdianto, K. 2014. *The Role of Chemical and Physical Properties of Substrate in the Deposition of Particles*. Thesis Doktor Tokyo University of Agriculture and Technology (TUAT) School of Bio-Applications and Systems Engineering: Tidak Diterbitkan.

Kusdianto, K., Naim, M. N., Sasaki, K., dan Lenggoro, I. W. 2014. "Immobilization of colloidal particles into sub-100nm porous structures by electrophoretic method in aqueous media". *Colloid and Surface: A Physicochemical and Engineering*, 459, 142-150.

Kusdianto, K., Gen, M., Tsukada, M., dan Lenggoro, I. W. 2014. "Insertion of presynthesized particles in the pores of honeycomb structure by an aerosol process". *Journal of the Society of Powder Technology Japan*, 51, 759-764.

Kyotani, T. 2002. "Chemical modification of carbon-coated anodic alumina films and their application to membrane filter". *Journal of Membrane Science*, 196, 231-239.

Losic, D., Cole, M. A., Dollmann, B., Vasilev, K., dan Griesser, H. J. 2008. "Surface modification of nanoporous alumina membranes by plasma polymerization". *Nanotechnology*, 19, 245-254.

- Martinson, A.B.F., Elam, J. W., Hupp, J. T., dan Pellin, M. J. 2007. "ZnO nanotube based dye-sensitized solar cells". *Nano Letters*, 7, 2183-2187.
- Masuda, H., Higashitami, K., dan Yoshida, H. 2006. *Powder Technology Handbook Third Edition*. New York: Taylor & Francis Group.
- Matsumoto, Y., Ishikawa, Y., dan Nishida, M. 2000. "A new electrochemical method to prepare mesoporous titanium (IV) oxide photocatalyst fixed on alumite substrate". *Journal of Physical Chemistry*, 104, 4204-4209.
- Menguturk, M dan Sverdrup, E. F. 1982. "A theory for fine particle deposition in two-dimensional boundary layer flows and application to gas turbines". *Journal of Engineering for Power*, 104, 68-76.
- Murakami, S., Kato, S., Nagano, S., dan Tanaka, S. 1992. "Diffusion characteristics of airborne particles with gravitational settling in a convention-dominant indoor flow field". *Ashrae Transactions*, 98, 82-97.
- Naim, M.N., Iijima, M., Sasaki, K., Kuwata, M., Kamiya, H., dan Lenggoro, I. W. 2010. "Electrical-driven disaggregation of the two-dimensional assembly of colloidal polymer particles under pulse DC charging". *Advanced Powder Technology*, 21, 534-541.
- Ortega-Cervantez, G., Rueda-Morales, G., dan Ortiz-Lopez, J. 2009. "Cold-wall CVD carbon nanotube synthesis on porous alumina substrates". *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 20, 403-407.
- Shankara, P. 2010. *CFD Simulation and Analysis of Particulate Deposition on Gas Turbine Vanes*. Thesis Magister The Ohio State University Department Aeronautical and Astronautical Engineering: Tidak Diterbitkan
- Soltani, M dan Ahmadi, G. 1994. "On particle adhesion and removal mechanisms in turbulent flows". *Journal Adhesion Science Technologi*, 8, 763-785.

- Uchikoshi, T., Ozawa, K., Hatton, B. D., Sakka, Y., dan Dense. 2001. "Bubble-free ceramic deposits from aqueous suspensions by electrophoretic deposition". *Journal of Materials Research*, 16, 321-324.
- Wong-ek, K. Et al. 2010. "Silver nanoparticles deposited on anodic aluminium oxide template using magnetron sputtering for surface-enhanced Raman scattering substrate". *Thin Solid Films*, 518, 7128.
- Wood, N. B. 1981. "A Simple Method for the Calculation of Turbulent Deposition to Smooth and Rough Surfaces". *Journal of Aerosol Science*, 12, 275-290.
- Yao, Qiang., Zhengwei Long., Qiang Dong, Shuiqing Li. 2009. "Three Dimensional Simulation of Electric Field and Space Charge in the Advanced Hybrid Particulate Collector". *Journal Of Electrostatics*, 835-843.
- Yau, K. K. dan Young, J. B. 1987. "The deposition of fog droplets on steam turbine blades by turbulent diffusion, Transactions of ASME". *Journal of Turbomachinery*, 109, 429-435.
- Yook, S. J., Asbach, C., dan Ahn, K. H. 2010. "Particle deposition velocity onto a face-up flat surface in a laminar parallel flow considering Brownian diffusion and gravitational settling". *Journal of Aerosol Science*, 41, 911-920.

Biodata Penulis



I Gede Wahyudi Mahendra Putra lahir di Denpasar, 14 Februari 1993. Anak dari Bapak Ir. Nyoman Gede Baliarta, MT dan Ibu Ir. Nyoman Kusumayani ini telah menempuh pendidikan di SD Negeri 6 Ubung Tahun 1999-2005, melanjutkan di SMP Negeri 10 Denpasar Tahun 2005-2008, dan melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 4 Denpasar Tahun 2008-2011. Penulis melanjutkan studi S1 di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Jurusan Teknik Kimia pada Tahun 2011-2015. Penulis pernah melaksanakan kerja praktek di PT. Pupuk Kalimantan Timur periode Juli-September 2014. Penulis juga aktif sebagai Ketua Study Excursion K51. Di akhir masa studi, penulis mengerjakan Tugas Akhir di Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran bersama patnernya Rosmalia Andini di bawah bimbingan Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng dan Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng. Penulis berhasil menyelesaikan tugas pra-Desain Pabrik Kimia dengan judul “Pabrik Gula Kristal Putih” dan Skripsi yang berjudul “Simulasi Numerik Deposisi *Charged Aerosol Particle* pada *Porous Structure*”. Saya ucapkan terima kasih terutama untuk partner saya Rosmalia Andini, teman-teman Lab Mixing, Ibu dr. Laksmi Duarsa,Sp.KK, Bapak Prof. Gede Wibawa dan keluarga, serta kedua orang tua saya atas segala dukungan dan bantuannya selama ini.

DATA PRIBADI

Nama	: I Gede Wahyudi M.P
Alamat	: Purimas Gianyar C5/5, SBY
No. Telepon	: 085239175555
Email	: gdwahyudi_its@yahoo.com

Riwayat Hidup Penulis



Rosmalia Andini

Lahir di Kota Jakarta pada tanggal 28 Desember 1993. Merupakan putri bapak Swesly dan ibu Nurfaidah yang telah menempuh pendidikan TK Muara Warta (1998-1999). Penulis melanjutkan pendidikan di SD Negeri 05 Pagi, Jakarta tahun 1999-2005, melanjutkan di SMP Negeri 109, Jakarta tahun 2005-2008, dan melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 8, Jakarta tahun 2008-2011. Penulis melanjutkan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Jurusan Teknik Kimia pada tahun 2011-2015. Penulis pernah melaksanakan kerja praktek di PT. PERTAMINA RU VI Balongan periode Juli 2014. Di akhir masa studi, penulis mengerjakan Tugas Akhir di Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran bersama patner I Gede Wahyudi M. P. di bawah bimbingan Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng dan Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng. Penulis berhasil menyelesaikan tugas pra-Desain Pabrik Kimia dengan judul “Pabrik Gula Kristal Putih” dan Skripsi yang berjudul “Simulasi Numerik Deposisi *Charged Aerosol Particle* pada *Porous Structure*”.

DATA PRIBADI

Nama : Rosmalia Andini
Alamat : Taman Permata Cikunir, B2
No. 4, Bekasi Selatan
No. Telepon : 0856 9229 5381
Email : rosmalia.andini@gmail.com

BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Dewasa ini, perkembangan teknologi dalam bidang *porous structure material* semakin berkembang. Penggunaan *porous structure* ini sudah banyak diaplikasikan pada berbagai bidang seperti sebagai *support* katalis (Matsumoto et al., 2000), membrane filter (Kyotani et al., 2002), dan pembuatan nanomaterial (Bogart et al., 2005). *Porous structure* ini banyak digunakan dikarenakan memiliki struktur yang unik seperti *high specific surface area*, dan dapat meningkatkan daya tahan dari struktur tersebut. Selain itu, efisiensi deposisi partikel di dalam *porous structure* terhadap *particle detachment* juga tinggi meskipun diberikan gaya dari luar (Kusdianto et al., 2014). Salah satu metode pembentukan *porous structure* adalah dengan *electrochemical anodization*. *Electrochemical anodization* pada substrat aluminium banyak digunakan untuk membentuk *porous structure* karena metode dan proses yang mudah, ukuran dan diameter *pore* dapat dikontrol dengan memvariasikan jenis elektrolit, *applied voltage*, dan waktu anodisasi. *Sehingga porous structure* dapat memberikan ruang untuk suatu partikel dapat terdeposisi pada strukturnya (Kusdianto, 2014). Deposisi partikel pada *porous structure* juga akan memberikan manfaat pada aplikasi fotokatalitik (Ishikawa et al., 2001) karena kemungkinan suatu partikel lepas dari porous structure lebih sedikit daripada partikel yang terdeposisi pada flat surface. (Losic et al., 2008)

Beberapa metode untuk mendeposisikan partikel di dalam *porous structure* dapat dilakukan menggunakan deposisi fase *liquid* atau fase gas. Contoh dari metode deposisi fase *liquid* adalah *electrodeposition* (Ishikawa et al., 2001), *dip coating* (Cervantez et al., 2009), *electrophoretic* (Kamada et al., 2005), dan *electrophoretic deposition* dengan menggunakan *pulsed* dan *constant DC* (Kusdianto et al., 2014). Sedangkan contoh dari metode deposisi fase gas adalah *chemical vapor deposition*

(Cervantez et al., 2009), *sputtering* (Wang et al., 2007), *atomic layer deposition* (Zhang et al., 2013), *pulse layer deposition* (Pereira et al., 2007), dan *plasma deposition* (Losic et al., 2008).

Metode deposisi dengan fasa gas adalah salah satu metode deposisi yang dapat meningkatkan struktur, *physical* dan *properties* dari substrate *anodized aluminium oxide* (AAO) dengan mendeposisikan suatu material ke porous *structure* AAO. Seperti contoh AAO yang diberi lapisan dari Au, Pd, Pt, dan Ti yang dilaporkan mampu meningkatkan *properties* AAO sebagai katalis.

Namun metode deposisi fase gas pada studi sebelumnya menjelaskan bahwa metode ini berasal dari *gas-to-solid state* (*thin film*) yang memerlukan suatu reaksi untuk mendeposisikan suatu partikel, sehingga kurang representatif bila digunakan sebagai *particle-to-particle route* yang tidak memerlukan terjadinya suatu reaksi. Maka dilakukanlah penelitian oleh Kusdianto (2014) mengenai deposisi *pre-synthesized particle* ke *porous structure*, untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada deposisi fasa gas dengan *particle-to particle route* agar dapat digunakan untuk partikel apapun tanpa tergantung dari suatu hal. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa partikel berhasil terdeposisi pada *porous structure* (Kusdianto, 2014).

Simulasi numerik (COMSOL Multiphysics ver 4.3, Stockholm) adalah salah satu yang digunakan untuk mensimulasikan deposisi partikel, studi mengenai deposisi ini dengan memperhatikan *electric field* pada *porous structure* dengan menggunakan model *single pore*. *Charged particle* diasumsikan mengikuti gerak elektrik berdasarkan gaya Coulomb. Dari hasil simulasi yang dilakukan, menunjukkan bahwa partikel dapat masuk kedalam *pores* ketika dinding substrat dilapisi oleh *conductive material* (Kusdianto et al., 2014). Namun simulasi yang dilakukan ini belum mensimulasikan gerakan partikel ke *porous structure*, karena hanya mensimulasikan garis gerak elektrik dari partikel.

Simulasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD) adalah salah satu alternatif yang mungkin dapat digunakan untuk

mensimulasikan gerak partikel pada *porous structure*. Simulasi numerik seperti CFD dapat digunakan untuk mensimulasikan gerak partikel (Versteeg et al., 1995). CFD merupakan *software* yang mendukung untuk mengamati pola alir yang kompleks dalam bentuk visual mengenai pergerakan partikel, memprediksi kemungkinan lintasan yang tidak stabil, memprediksi karakteristik Bergeraknya partikel yang dipengaruhi muatan listrik, dan mampu mengukur dan membandingkan pergerakan partikel dengan parameter kontrol yang mampu diatur dan diubah-ubah, seperti perbedaan muatan antar partikel, jumlah partikel, ukuran partikel, dan sebagainya.

I.2 Rumusan Masalah

Dari uraian diatas, dapat disimpulkan bahwa belum ada penelitian sebelumnya secara simulasi mengenai deposisi *charged particle* di dalam *porous structure*, sehingga dilakukan penelitian berbasis simulasi dengan menggunakan suatu *software*.

I.3 Batasan Masalah

Pada Penelitian ini batasan-batasan penelitian yang digunakan adalah :

1. Deposisi *charged particle* pada fasa gas ke *porous structure*.
2. Jarak partikel dengan *substrate*, muatan listrik pada partikel dan *substrate*, ukuran partikel, dan kondisi fluida pembawa dan jumlah *pore* pada *porous structure*.
3. Pola gerakan partikel yang terjadi di dalam media fasa gas menuju *porous structure*.

I.4 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kondisi yang optimum pada proses deposisi dari *charged particle* pada *porous structure* berdasarkan simulasi dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan FLUENT dan *User defined Function* (UDF). UDF digunakan untuk persamaan yang tidak

tersedia di CFD seperti persamaan untuk potensial dan arus listrik. Selanjutnya program UDF tersebut diintegrasikan ke pemodelan aliran fluida dan multi fasa dengan *software* paket FLUENT

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah agar tidak diperlukannya lagi melakukan penelitian secara eksperimen untuk mendeposisikan partikel pada suatu *porous structure* sehingga mengurangi potensi kesalahan seperti sulitnya menjaga stabilitas generator untuk *men-charge* partikel, serta mengurangi waktu dan biaya penelitian, sehingga dapat dijadikan model untuk deposisi partikel.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Deposisi Partikel

Deposisi partikel adalah suatu fenomena dimana partikel yang tersuspensi pada suatu fluida berpindah ke suatu permukaan dan membentuk lapisan yang permanen atau sementara. Fenomena deposisi partikel banyak digunakan pada berbagai bidang seperti *fouling* yang terjadi pada suatu *channel*, masalah *microcontamination* pada proses material dan desain deposisi partikel pada suatu pabrikasi suatu alat. (Masuda, 2006)

Deposisi partikel dapat dilakukan pada fase liquid atau pada fase gas. Penjelasan dari kedua fase ini sebagai berikut.

II.1.1 Deposisi Fase *Liquid*

Deposisi partikel tersuspensi menggunakan *electrophoretic deposition* (EPD) mendukung fenomena *electrokinetic* seperti elektroforesis, hidrolisa air, dan elektro-osmosis (Uchikoshi et al., 2001). Ketika medan listrik menunjukkan cairan dalam jumlah besar yang terdiri dari partikel tersuspensi, gerakan dari partikel bermuatan yang signifikan pada suspensi atau elektroforesis akan terlihat. Pada daerah di sekitar elektroda, terjadi deposisi partikel bermuatan di atas permukaan substrat yang berbeda muatan. Sejak saat itu, berbagai teknik untuk mendeposisikan partikel ditemukan. Namun, gelembung yang dihasilkan dari hidrolisis air dapat mengganggu deposisi dan menyebabkan partikel nm-order gagal terdepresiasi (Naim et al., 2010). *Thick film* menggunakan EPD juga berkontribusi pada elektro-osmosis yang dapat merusak lapisan deposit dan permukaan ketika waktu deposisi lama dilakukan (Besra et al., 2008). Maka dari itu, kontrol dari parameter EPD tertentu sangat penting untuk memastikan deposit yang terganggu selama proses deposisi.

Porous structure yang unik pada *film* secara luas digunakan sebagai wadah untuk logam untuk katalis dengan luas permukaan

dengan spesifikasi yang tinggi dan untuk tujuan lain seperti membran filter dari *template* yang sulit untuk nano-material. Pendekatan elektroforesis menggunakan *porous substrate* berdasarkan *anodic aluminium oxide* (AAO) atau grafit telah dilaporkan dengan menggunakan media *non-aqueous* (Haber et al., 1996).

II.1.2 Deposisi Fase Gas

Saat ini, bahan-bahan dengan *porous structure* telah secara luas dianggap dalam berbagai bidang aplikasi untuk meningkatkan daya tahan kimia strukturnya. *Porous structure* dapat digunakan sebagai *support* pada katalis (Matsumoto et al., 2000), membran filter (Kyotani et al., 2002), sebuah wadah metal untuk *coloring*, *template* yang sulit untuk nano-material (Bogart et al., 2005), dan aplikasi lain dengan tujuan fotokatalitik (Ishikawa et al., 2001). Anodisasi elektrokimia dari substrat aluminium telah banyak digunakan untuk membuat *porous structure*, karena metode ini telah dibuktikan dan prosesnya sederhana. Diameter pori dapat divariasikan dengan mengubah beberapa parameter, seperti tegangan yang diberikan, jenis elektrolit, dan waktu anodisasi.

Penyisipan partikel atau *thin film* pada *porous structure* dapat dilakukan menggunakan deposisi fase *liquid* dan gas. *Chemical vapor deposition* (CVD), *sputtering*, deposisi lapisan atom, dan deposisi plasma adalah contoh metode untuk deposisi fase gas. Metode deposisi fase gas pada studi sebelumnya dijelaskan bahwa metode ini berasal dari *gas-to-solid state* (*thin film*), sehingga kurang representatif bila digunakan sebagai *particle-to-particle route*. Selanjutnya, deposisi partikel di dalam *porous structure* dengan menggunakan partikel Ag (*pre-synthesized particles*) telah diteliti oleh Kusdianto et al. (2014). Dengan memanipulasi *surface* dari AAO menjadi konduktif, maka efisiensi deposisi partikel di dalam *porous structure* bisa ditingkatkan.

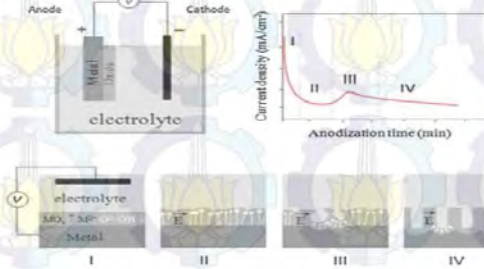
II.2 Porous Structure

Pada fenomena deposisi dibutuhkan suatu media sebagai tempat partikel terdeposisi. Pada penelitian ini digunakan material yang memiliki struktur *porous*. Dimana *porous structure* adalah suatu material yang memiliki ukuran *pore* tertentu, dimana *pore* tersebut dapat dibentuk dengan berbagai ukuran *pore* dan strukturnya. Struktur *porous* yang terbentuk seluruh permukaannya dan ruang kosong pada *pore* dapat digunakan pada bermacam-macam aplikasi. Material yang memiliki luas permukaan yang luas seperti struktur *porous* dapat digunakan sebagai katalis, reaktor kimia, dan penyimpanan gas. (Johannson, 2010)

Material yang memiliki struktur porous menurut IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) dibagi menjadi:

1. *Micropores* dimana memiliki ukuran diameter *pore* $< 2\text{nm}$,
2. *Mesopores* dimana memiliki ukuran diameter *pore* antara 2nm sampai 50 nm dan
3. *Macropores* dimana memiliki diameter *pore* $> 50\text{nm}$.

Electrochemical anodizing of aluminium adalah contoh kombinasi antara proses kimia dan fisik. Reaksi kimia terjadi setelah menerapkan tegangan tertentu. Produk dari proses ini disebut. Ilustrasi pembentukan substrat AAO digambarkan pada Gambar II.1. Awalnya, permukaan logam ditutupi dengan lapisan oksida seragam setelah menetapkan medan listrik konstan, setelah itu densitasnya akan turun dengan cepat (Tahap I). Medan listrik difokuskan lokal membentuk lubang yang ditunjukkan pada Tahap II. Pori-pori lokal pertama terbentuk dan menjadi situs untuk pertumbuhan pori selanjutnya (Tahap III). Pembentukan pori awal terjadi pada tahap ini. Akhirnya, proses pertumbuhan pori mencapai keadaan stabil dan pori-pori terdistribusi seragam akan terbentuk. (Jani et al., 2013)



Gambar II.1 Ilustrasi Pembentukan AAO

II.3 *Charged Particle*

Partikel yang akan dideposisikan pada *porous structure* adalah partikel yang memiliki muatan listrik atau biasa disebut *charged particle*. *Charged Particle* adalah partikel yang memberikan respon terhadap gaya elektrostatis disekitar permukaan atau *charged particle* lainnya. *Charged particle* dapat memiliki muatan positif atau negatif tergantung dari sumber dan metode yang digunakan dalam pemberian muatan tersebut. (Hinds, 1999)

II.4 *Particle Tracking*

Simulasi numerik pada deposisi partikel telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya, meskipun pada kasus simulasi deposisi *charged particle* masih belum ada yang melakukannya. Simulasi awal mengenai perpindahan partikel dan deposisi partikel ditujukan untuk menganalisis pengaruh seperti suhu permukaan, diameter partikel, suhu partikel, dispersi turbulen dan sebagainya pada deposisi. Terdapat 2 metode permodelan pada deposisi partikel yaitu Euler dan Lagrangian. (Shankara, 2010)

Untuk fasa gas selalu dimodelkan dengan pendekatan Euler dimana gas diperlakukan sebagai kontinum dan dapat diselesaikan dengan baik oleh simulasi RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) atau DNS/LES (*Direct Numerical Simulation / Large Eddy Simulation*). Metode Euler - Euler memodelkan *tracking* partikel dengan berfokus pada volume kontrol sedangkan metode Euler -

Lagrangian berfokus pada *tracking* partikel. Metode Euler menganggap partikel sebagai kontinum dan mengembangkan *tracking* partikel berdasarkan persamaan konservasi yang diterapkan berdasarkan basis *volume control* dengan pengelompokan partikel pada berbagai *volume control*. (Shankara, 2010)

II.4.1 Eulerian Particle Tracking

Metode *tracking particle* Euler adalah metode yang paling disukai untuk lingkungan dalam suatu ruang (Murakami et al., 1992). Friedlander et al. (1957) mengembangkan model deposisi pertama kali berdasarkan pendekatan Euler. Menguturk dan Sverdrup (2008) mengembangkan model Euler berdasarkan pada asumsi bahwa partikel yang sangat kecil oleh karena itu untuk efek inersia dapat diabaikan. Dehbi (2008) mencatat bahwa pendekatan Euler sangat cocok hanya untuk arus dengan suspensi partikel padat di mana interaksi partikel - partikel yang cukup besar tidak dapat diabaikan. Yau & Young (1987), Wood (1981), dan Kladas (1993) menggunakan metode Euler untuk menyelesaikan permasalahan mengenai partikel atas dasar bahwa partikel berada di batas luar lapisan, sehingga memecahkan persamaan kontinuitas dalam kondisi aliran turbulen. Huang et al. (1987) dan Ahluwalia et al. (1986) menggunakan model deposisi Euler untuk mensimulasikan pengendapan partikel halus pada turbin gas batubara. Mereka berdua mengasumsikan bahwa partikel mengalami efek difusi Brown, difusi turbulen dan *thermophoresis*.

II.4.2 Lagrangian Particle Tracking.

Pendekatan Lagrangian memperlakukan partikel sebagai fase terdispersi dan *tracking* partikel secara individu. Fraksi volume partikel biasanya diasumsikan diabaikan dan pembawa volume fasa dan interaksi antar partikel biasanya diabaikan. Kallio dan Reeks (1989) menghitung pengendapan partikel dalam medan aliran turbulen dengan simulasi menggunakan model Lagrangian dalam *turbulent duct*. Mereka menyelesaikan persamaan gerak

untuk partikel dengan waktu relaksasi dari 0,3 sampai 1000. Waktu relaksasi partikel adalah suatu ukuran untuk inersia partikel dan menunjukkan skala waktu dimana setiap *slip velocity* antara partikel dan cairan diseimbangkan. Waktu relaksasi biasanya adalah waktu yang dibutuhkan oleh partikel untuk merespon perubahan dalam kecepatan cairan dan tergantung pada ukuran partikel, densitas partikel, dan viskositas fluida. Persamaan waktu relaksasi partikel adalah:

$$\tau_{12}^x = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (\text{II.1})$$

Model ini menunjukkan pendekatan yang baik dengan data eksperimen dari Liu dan Agarwal (1974). Ounis et al. (1993) dan Brooke et al. (1994) menggunakan pendekatan Lagrangian dan menyelesaikan *carrier phase flow* dengan DNS sementara Wang dan Squires (1996) menggunakan metode LES untuk mensimulasikan medan aliran dalam perhitungan Euler - Lagrangian. Guha (2008) mencatat bahwa gerakan partikel secara signifikan dipengaruhi oleh turbulensi dan fluktuasi kecepatan medan aliran sehingga diperlukan perhitungan dengan metode Lagrangian. Pendekatan Lagrangian mampu memodelkan secara lebih rinci dan realistis dalam pengendapan partikel karena persamaan gerak sesaat dapat diselesaikan untuk setiap partikel yang bergerak melalui bidang pusaran cairan. Metode ini berlaku untuk semua ukuran partikel. Selain itu, metode ini mampu memberikan informasi mengenai tabrakan partikel pada permukaan dan dapat menjelaskan *sticking model*. El - Batsh et al. (2002) merintis Lagrangian DPM (*Discrete Metode Phase*) permodelan dengan perangkat lunak CFD, FLUENT dapat memodelkan deposisi berdasarkan pendekatan Euler - Lagrangian dan berhasil menunjukkan hasil yang baik untuk berbagai kasus percobaan. Model deposisi ini didasarkan pada tiga proses: transport partikel, *particle sticking*, dan *particle detachment* dan berfungsi sebagai dasar untuk pengembangan model OSU. Ai et al. (2009) yang bekerja pada El - Batsh mempelajari interaksi partikel dan dinding pada penelitian sebelumnya. Mereka mengembangkan

dan memvalidasi model deposisi dengan hasil eksperimen deposisi pada film pendinginan. Model OSU merupakan perpanjangan dari model yang digunakan oleh Ai et al. dan dimaksudkan untuk memperluas penerapan model deposisi untuk geometri baling-baling turbin yang sebenarnya dengan film yang pendinginan.

Mazur et al. (2006) berhasil menggunakan metode LES dengan *software* CFD, FLUENT untuk simulasi deposisi partikel pada baling-baling turbin. Abuzeid et al. (1990) memodelkan gerak partikel dalam medan aliran turbulen menggunakan kedua metode Euler dan Lagrangian. Mereka menemukan bahwa simulasi Lagrangian lebih akurat daripada Euler untuk berbagai ukuran partikel. Selain itu, perhitungan tracking partikel Lagrangian memberikan informasi tentang jumlah partikel yang menumbuk permukaan, kecepatan tumbukan dan arah partikel yang relatif terhadap permukaan.

II.5 Metode Particle Tracking pada CFD

Metodologi pelacakan partikel yang digunakan dalam model OSU didasarkan pada *Discrete Phase Model* (DPM) dari perangkat lunak simulasi CFD, FLUENT 6.3.26. FLUENT yang digunakan untuk simulasi *tracking* partikel menggunakan Ohio *Supercomputer Center* (OSC). *Tracking* partikel dalam FLUENT dibagi menjadi dua fase: *carrier phase* dan *discrete phase*. Model DPM dalam *tracking* partikel menggunakan metode Lagrangian dan untuk medan aliran *carrier phase* diselesaikan terlebih dahulu untuk dapat mencapai kondisi *steady state* sebelum *discrete phase* dimasukkan ke dalam *carrier phase*. Partikel dianggap *discrete phase* karena *particle loading volume* diabaikan dalam semua kasus dibandingkan dengan *volume carrier phase*.

II.5.1 Discrete Phase

FLUENT memprediksi lintasan *discrete phase* partikel (atau *droplet* atau gelembung) dengan mengintegrasikan persamaan gaya yang bekerja pada partikel, yang ditulis dengan referensi model Lagrangian. Dimana pada persamaan gaya ini,

inersia partikel dan gaya yang bekerja pada partikel, dapat ditulis dengan (untuk arah x dalam koordinat *Cartesian*) sebagai:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (\text{II.2})$$

Dimana pada sisi kanan adalah gaya *drag* pada partikel per satuan massa partikel, sedangkan pada sisi kanan selanjutnya adalah efek gravitasi pada partikel dan gaya F_x yang menunjukkan semua gaya lainnya yang bekerja. Dalam semua simulasi dalam penelitian ini, asumsi berikut dibuat mengenai fase terdispersi berdasarkan kondisi eksperimental dan karakteristik partikel yang digunakan dalam percobaan:

- Partikel-partikel adalah rigid sphere dan mereka dianggap sebagai titik yang terletak di pusat bola.
- Kepadatan partikel lebih besar dari densitas fluida
- Partikel tidak mempengaruhi turbulensi yang terjadi pada fluida. Percobaan dengan Kulick et al. (1994) dan Kaftori et al. (1995) menunjukkan bahwa untuk fraksi volume rendah, turbulensi dapat diabaikan. Dan juga di daerah dekat dinding di mana konsentrasi partikel mungkin besar, dimana intensitas turbulensi dimodifikasi dengan jumlah partikel yang sangat kecil sehingga dapat diabaikan.
- Untuk ukuran partikel dalam penelitian ini, skala sub-grid memiliki efek yang dapat diabaikan pada lintasan partikel.
- Pengaruh kekasaran bahan tidak dipertimbangkan ketika partikel memantul pada dinding

Partikel diasumsikan berbentuk *spherical* partikel dimana pada penelitian ini beberapa gaya yang bekerja pada partikel adalah sebagai berikut:

F_x = gaya drag + added mass effect + history effect + gaya grafitasi + Gaya Buoyancy + gaya angkat + gaya intercollision + gaya Brownian + gaya thermophoresis + gaya magnus + gaya basset + gaya electrostatic

Berbagai model deposisi yang telah dilakukan telah menggunakan salah satu atau kombinasi dari gaya-gaya yang disebutkan di atas yang didasarkan pada karakteristik aliran partikel yang diharapkan. Identifikasi gaya yang mempengaruhi partikel untuk kasus tertentu sangat penting untuk *tracking* partikel yang akurat.

Gaya *drag* adalah gaya Stokes yang bekerja pada partikel karena kecepatan relatif antara cairan dan partikel terhadap arah aliran. Gaya *drag* adalah gaya yang paling dominan untuk gerakan partikel, terutama ketika partikel memiliki bilangan Reynolds kurang dari 100. Gaya *drag* didasarkan pada hukum Stokes ketika $Re_p < 1$, hukum modifikasi Stokes ketika $1 < Re_p < 500$ dan hukum Newton ketika $500 < Re_p < 2 \times 10^5$.

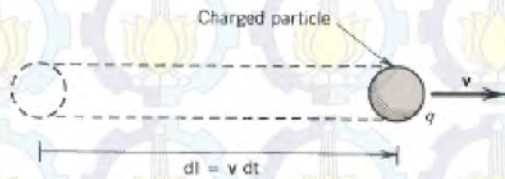
Gaya elektromagnetik merupakan gaya yang sangat mempengaruhi percepatan dan transport dari *charged particle*. Muatan pada permukaan elektroda dapat memberikan percepatan dan fokus. Gaya elektrik pada partikel pada suatu posisi dapat dijelaskan dengan rumus hukum Coulomb sebagai berikut:

$$F = \sum_n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_n u_{rn}}{r_n^2} \quad (II.3)$$

Dimana q_0 adalah muatan yang diberikan pada partikel dan penjumlahan dari seluruh muatan pada elektroda.

Suatu rumus sangat diperlukan untuk menjelaskan total gaya elektrik dan magnetic yang bekerja pada suatu partikel untuk mengetahui dinamika partikel tersebut. Seperti pada gambar dibawah ini dimana partikel diberikan charged sebesar q dan kecepatan sebesar v . Partikel bergerak sejauh $dt = dl/v$. dan gerakan partikel digambarkan sebagai $q/(dl/v)$. *Charged particle* yang bergerak dari posisi awal dirumuskan sebagai:

$$idl = \frac{qdl}{|dl|/|v|} = qv. \quad (II.4)$$



Gambar II.2 Ilustrasi Gerak *Charged Particle*

Metode numerik yang digunakan untuk melihat gerak *charged particle* dan pola deposisi pada substrat menggunakan model Lagrangian. Dimana diasumsikan partikel yang digunakan adalah *spherical particle*. Gaya Brownian pada partikel dapat diabaikan karena energi kinetik pada partikel disebabkan oleh medan listrik yang lebih besar gaya yang diberikan dibandingkan dengan *random thermal energy*. (Kim et al., 2006)

II.6 Model Deposisi Partikel

Tujuan utama dari permodelan deposisi adalah untuk mengakuratkan model interaksi *particle-wall*. FLUENT telah membuat batasan kondisi ketika partikel menabrak batas permukaan:

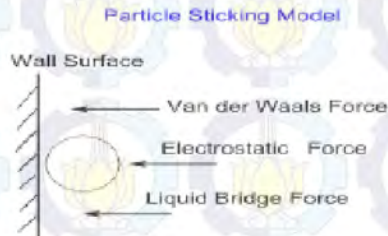
- *Reflect* – elastis atau tidak elastisnya tabrakan
- *Trap* – partikel yang terperangkap di dinding
- *Escape* – partikel yang lolos melalui batas
- *Wall-jet* – particle spray bertindak sebagai jet dengan Weber number yang tinggi dan tidak ada liquid film
- *Wall-film* – melekat, melambung, tersebar, dan berbasis flash pada dampak energy dan temperatur dinding
- *Interior* – partikel melewati zona batas dalam

Karena tidak ada kondisi batas yang akurat yang mewakili interaksi *particle-wall* pada rezim kompresor dan turbin, maka model deposisi dibuat pada FLUENT menggunakan *User Defined Functions* (UDF) yang akan berfungsi sebagai kondisi batas pada permodelan interaksi *particle-wall*. (Shankara, 2010)

II.6.1 *Particle Sticking*

Ada tiga gaya yang berkontribusi pada adhesi partikel, yaitu:

- Gaya Van der Waals – Muncul karena interaksi molekul antara permukaan padat
- Gaya Elektrostatis – Disebabkan oleh pengisian muatan partikel secara elektrik pada aliran gas
- Gaya *Liquid Bridge* – Disebabkan oleh pembentukan jembatan *liquid* antara partikel dan permukaan.



Gambar II.3 Gaya yang Terjadi pada Adhesi Partikel pada Permukaan

(sumber: Shankara, 2010)

Gaya Van der Waals adalah gaya yang paling berkontribusi untuk adhesi permukaan dalam kondisi kering (Soltani dan Ahmadi, 1994). Gaya Van der Waals dihitung menggunakan pendekatan mikroskopis dan makroskopis. Pendekatan mikroskopis berdasarkan pada interaksi individu molekul, sedangkan pendekatan makroskopis berdasarkan pada sifat sebagian bagian yang berinteraksi. Salah satu kelemahan dari teori-teori awal adalah efek dari kontak deformasi pada gaya adhesi diabaikan. Johnson et al. (1971) menggunakan energi permukaan dan efek deformasi permukaan untuk mengembangkan model. Model ini disebut teori JKR. Soltani dan Ahmadi menggunakan teori JKR sebagai dasar untuk membentuk evaluasi dari kecepatan geser kritis minimum yang akan digunakan untuk saat kritis pada pelepasan partikel. Model JKR memberikan *sticking force*

berdasarkan pada ukuran partikel dan sifat bahan dengan konstanta yang berasal dari percobaan. *Sticking force* berdasarkan model JKR adalah sebagai berikut:

$$F_{po} = k_s W_A d_p \quad (\text{II.5})$$

dimana k_s adalah konstanta yaitu $3\pi/4$. W_A adalah *work of sticking* yaitu konstan tergantung pada sifat material partikel dan permukaannya, dengan satuan J/m^2 . Konstanta ini diperoleh dari eksperimen untuk beberapa bahan. Untuk partikel apapun, koefisien restitusi didefinisikan sebagai rasio dari kecepatan *rebound* partikel dengan kecepatan normal partikel. Ketika kecepatan normal partikel menurun, kecepatan *rebound* partikel menurun dan akhirnya mencapai titik dimana tidak ada *rebound* terjadi dan partikel tertangkap. Kecepatan dimana terjadinya penangkapan partikel ini disebut kecepatan kritis/kecepatan penangkapan (*capture velocity*) (Brach et al., 1992). Pada model ini, *capture velocity* dari partikel telah dihitung berdasarkan data eksperimen dan diberikan sebagai berikut:

$$v_{cr} = \left(\frac{2E}{dp}\right)^{10/7} \quad (\text{II.6})$$

dimana E adalah gabungan modulus Young yang ditentukan berdasarkan modulus Young pada partikel dan permukaan. Kecepatan normal partikel (v_n) kemudian dibandingkan dengan *capture velocity*. Jika kecepatan normal partikel kurang dari *capture velocity*, maka partikel akan menempel pada permukaan, atau akan melambung.

II.7 CFD (Computational Fluid Dynamic)

CFD (*Computational Fluid Dynamics*) adalah teknik numerik untuk penyelesaian persamaan pengaturan aliran fluida didalam aliran fluida tertentu. Aliran fluida dapat digambarkan dengan menggunakan persamaan Navier's stoke. Persamaan ini diturunkan dengan mempertimbangkan kesetimbangan massa, momentum, dan energi di dalam elemen fluida, menghasilkan sejumlah penurunan persamaan parsial. Persamaan ini dilengkapi dengan menambahkan persamaan aljabar lain dari termodinamika

seperti persamaan keadaan untuk massa jenis dan persamaan pokok untuk menjelaskan reologi.

Kode CFD tersusun atas algoritma-algoritma numerik yang dapat menyelesaikan permasalahan aliran fluida. Suatu kode CFD terdiri dari tiga elemen utama yaitu *pre-processor*, *solver*, dan *post-processor*. (Versteeg, 2007)

Pre-processing meliputi masukan dari permasalahan aliran ke suatu program CFD dan transformasi dari masukan tersebut ke bentuk yang cocok digunakan oleh solver. Langkah-langkah dalam tahap ini:

- Pendefinisian geometri yang dianalisa.
- *Grid generation*, yaitu pembagian daerah domain menjadi bagian-bagian lebih kecil yang tidak tumpang tindih.
- Seleksi fenomena fisik dan kimia yang perlu dimodelkan.
- Pendefinisian properti fluida.
- Pemilihan *boundary condition* (kondisi batas) pada kontrol volume atau sel yang berimpit dengan batas domain.
- Penyelesaian permasalahan aliran (kecepatan, tekanan, suhu, dan sebagainya) yang didefinisikan pada titik nodal dalam tiap sel. Keakuratan penyelesaian CFD ditentukan oleh jumlah sel dalam grid.

Secara umum metode numerik solver tersebut terdiri dari langkah-langkah sebagai berikut:

- Prediksi variabel aliran yang tidak diketahui dengan menggunakan fungsi sederhana.
- Diskretisasi terhadap semua persamaan yang terlibat menjadi sistem persamaan aljabar.
- Penyelesaian persamaan aljabar dengan metode iterasi.

Post-processing merupakan tahap visualisasi dari hasil tahapan sebelumnya. *Post-processor* semakin berkembang dengan majunya *engineering workstation* yang mempunyai kemampuan grafik dan visualisasi cukup besar. Alat visualisasi tersebut antara lain :

- Domain geometri dan *display*.
- Plot vektor.

- Plot kontur.
- Plot 2D dan 3D *surface*.
- Manipulasi tampilan (translasi, rotasi, skala, dan sebagainya).
- Animasi *display* hasil dinamik.

II.7.1 Persamaan Transport Senyawa

Model-model kekekalan massa, momentum dalam koordinat kartesius adalah sebagai berikut :

1. Persamaan Kontinuitas (Hukum Kekekalan Massa)

Persamaan kontinuitas untuk suatu fluida compressible pada aliran steady state dalam notasi dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (\text{II.7})$$

Untuk aliran *incompressible*, nilai densitas ρ adalah konstan dan persamaan menjadi :

$$\text{Div} (u) = 0 \quad (\text{II.8})$$

2. Persamaan Momentum

Tiga persamaan momentum yang terdiri dari masing-masing arah disebut persamaan Navier Stokes. Pada beberapa hal, *momentum transport* akibat konveksi dan difusi, beberapa *momentum source*-nya diikutsertakan.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] + \rho g_i + F_i \quad (\text{II.9})$$

Pada persamaan (II.9), *convection term* berada pada persamaan sebelah kiri. Persamaan pada sebelah kanan merupakan *pressure gradient*, *source term*, gaya gravitasi, dan *source term* yang lain.

II.7.2 Permodelan untuk Turbulensi

Turbulensi merupakan suatu fenomena yang tidak linier, tiga dimensi, dan berubah terhadap waktu. Permodelan untuk

turbulensi yang digunakan pada penelitian ini yaitu *realizable k-ε* model. *Realizable* menunjukkan bahwa model ini bersifat fleksibel untuk *costarin mathematic* pada normal stress, dan konsisten terhadap aliran turbulen dan cocok digunakan untuk *swirling flows*. Untuk mendapatkan persamaan Reynold stresses dalam keadaan normal pada aliran *incompressible* digunakan persamaan :

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3}k - 2\nu_t \frac{\partial U}{\partial x} \quad (\text{II.10})$$

$$\nu_t \equiv \frac{\mu_t}{\rho} \quad (\text{II.11})$$

Eddy viscosity dihitung dengan menggunakan persamaan

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{II.12})$$

Energi kinetik turbulen

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (\text{II.13})$$

Dimana k adalah energi kinetik turbulen dan ε adalah *dissipation rate* dari energi kinetik turbulen.

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (\text{II.14})$$

Untuk standart dan *realizable k-ε models*, i dari Pr_t adalah 0,85. *Dissipation rate* dari energi kinetik turbulen menggunakan persamaan :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho C_{1\varepsilon} S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (\text{II.15})$$

Dimana

$$C_1 = \max \left(0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right), \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (\text{II.16})$$

Permodelan Energi Kinetik

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (\text{II.17})$$

Dalam menyelesaikan *transport equation* untuk *turbulence kinetic energy* dan menentukan *boundary condition* dengan pengaruh Reynold stresses, persamaan yang digunakan adalah :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \rho \epsilon (1 + 2M_t^2) + S_k \quad (\text{II.18})$$

Dimana σ_k adalah 0,82. (Theory Guide, Ansys fluent 14.0)

II.7.3 Discrete Phase Model

Untuk keakuratan data berupa *droplet drag coefficients* dalam permodelan deposisi partikel, digunakan *Dynamic Drag Model Theory*. Model ini bisa digunakan dalam berbagai kondisi. Diasumsi bahwa *droplet* tetap dalam bentuk *spherical* sepanjang domain. Untuk menentukan *drag coefficient* dari *spherical droplet* digunakan persamaan:

$$C_{d,sphere} = \begin{cases} 0,424, Re > 1000 \\ \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{\frac{2}{3}} \right), Re \leq 1000 \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

II.7.4 Stochastic Tracking

Ketika aliran turbulen, FLUENT akan memprediksi pergerakan dari partikel menggunakan kecepatan rata-rata fase fluida, \vec{u} , menggunakan persamaan :

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (\text{II.20})$$

$F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$ adalah *drag force per unit particle mass*.

$$\text{Dimana } F_D = \frac{18\mu C_D Re}{24\rho_p d_p^2} \quad (\text{II.21})$$

(Theory Guide, Ansys fluent 14.0)

II.7.5 Kondisi Batas untuk Wall

1. *Reflect model* : bila partikel mengenai dinding akan memantul seperti terlihat pada gambar II.4. Partikel memantul dari

dinding dengan perubahan momentum yang didefinisikan oleh koefisien restitusi.

$$e_n = \frac{v_{2,n}}{v_{1,n}} \quad (\text{II.22})$$

Dimana e_n didefinisikan sebagai jumlah momentum pada arah normal ke dinding.

2. *Escape model* : bila partikel melewati bagian keluaran (*outflow* atau *pressure outlet*) maka perhitungan partikel dihentikan.



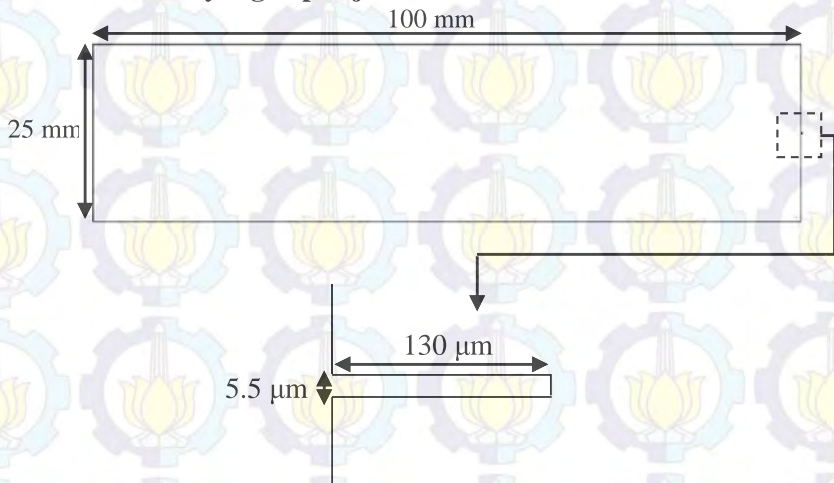
Gambar II.4 Kondisi Batas untuk Permodelan *Wall*



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan Pemodelan Lagrangian. Distribusi medan listrik dievaluasi dan pemilihan model persamaan potensial dan arus listrik yang diselesaikan secara terpisah dari FLUENT (*User Defined Function*). Selanjutnya program tersebut diintegrasikan ke pemodelan aliran fluida dan multifasa dengan *software* paket FLUENT. Untuk memodelkan dinamika partikel, dipilih model dinamika partikel yaitu model Lagrangian *Discreate Phase Model* (DPM). Pengaruh dinamika fluida, ukuran partikel, dan medan listrik terhadap dinamika partikel dievaluasi dengan berbagai kondisi operasi seperti jumlah *pore* dan potensial listrik yang diberikan. Hasil yang diharapkan utamanya adalah pengembangan model dengan CFD yang sesuai untuk sistem *charged particle deposition*

III.1 Sistem yang Dipelajari



Gambar III.1 Dimensi Simulasi *Charged Particle Deposition*

Gambar III.1 menunjukkan gambar dari metode deposisi *charged particle* secara 2 dimensi. Eksperimen set yang dimodelkan adalah berupa sebuah persegi panjang sebagai *wall* dimana terdapat *charged particle* dan *porous structure substrate*.

III.2 Kondisi Batas

Kondisi batas yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. *Porous structure plate* sebagai *collecting plate/substrat* sebagai tempat partikel terdeposisi yang dianggap sebagai *wall* dengan *setting* sebagai *trapped*.
2. *Substrate* bagian atas dan bawah *porous structure* sebagai *wall* dengan *setting* sebagai *escaped*.
3. Bagian atas, bawah dan dinding sebagai *wall* dengan *setting* *reflect*.
4. *Cone jet* sebagai *inlet charged particle* didefinisikan sebagai *velocity inlet* dimana kecepatan fluida masuk didefinisikan sebagai variabel.
5. *Outlet* fluida sebagai *outflow*

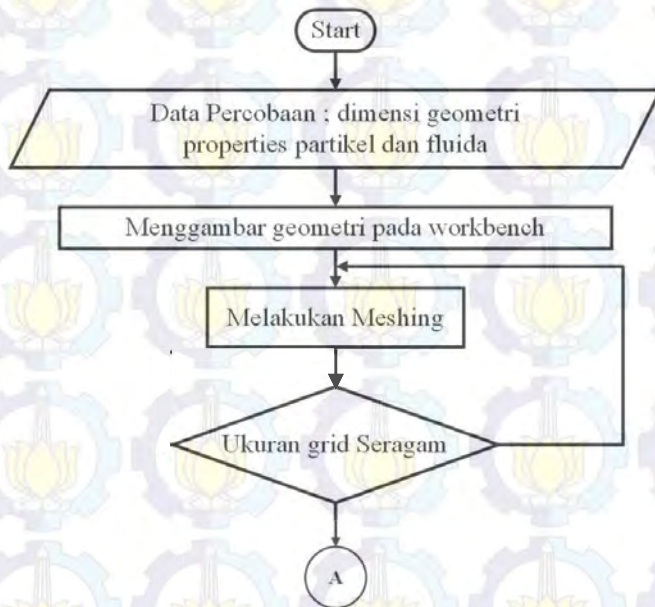
III.3 Prosedur Penelitian untuk Permodelan

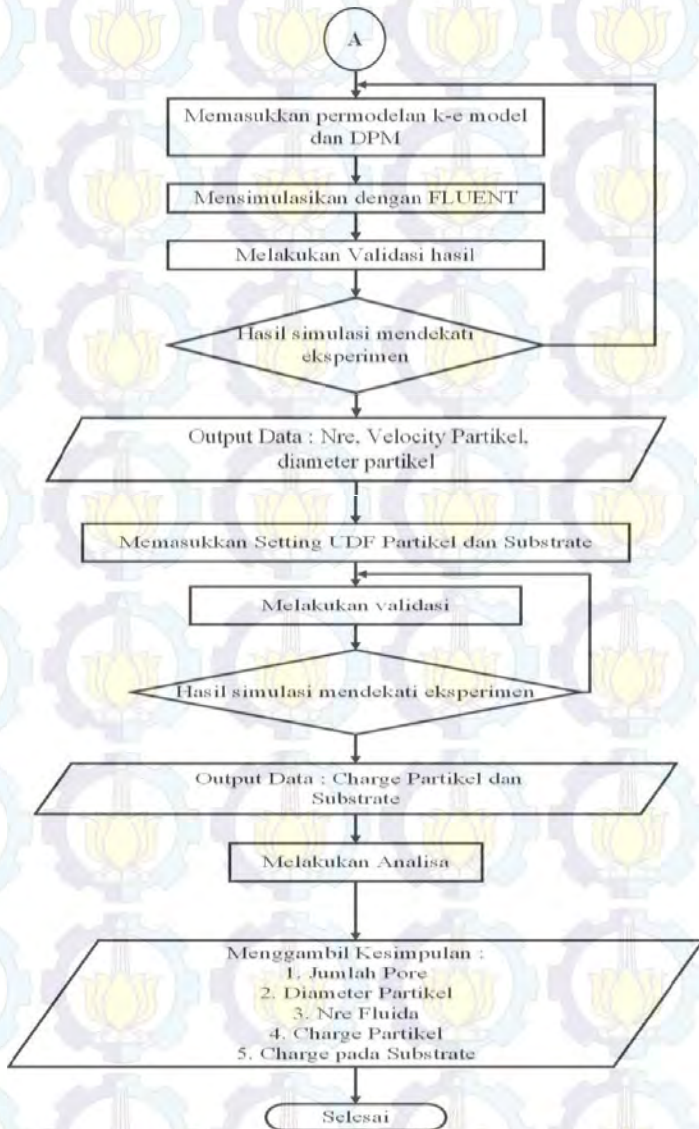
Untuk mempelajari karakteristik aliran, distribusi kecepatan, jumlah partikel yang terdeposisi, dan voltase yang diberikan pada partikel dan *substrate*, digunakan *charged particle deposition* dua dimensi secara simulasi dengan menggunakan *software Computational Fluid Dynamics (CFD) FLUENT*.

Langkah–langkah yang digunakan meliputi :

1. Membuat geometri model 2 dimensi dengan ukuran 100 mm x 25 mm.
2. Melakukan *meshing* untuk membagi bidang geometri menjadi bidang-bidang yang lebih kecil sampai dengan nilai *skewness* dibawah 10% serta memberikan definisi *cone jet inlet*, *wall*, dan *substrate*.
3. Mengimport *grid* ke dalam FLUENT dan memeriksa *grid* tersebut sampai dapat terbaca pada FLUENT.
4. Memilih formulasi *solver*, dimana mengaktifkan:

- Langrangian model (*Discrete Phase Model*) sebagai permodelan partikel.
 - Model aliran laminar dan k- ϵ turbulen model sebagai permodelan fluida.
5. Memberikan *properties* partikel Ag (*silver*), *properties* fluida berupa CO₂ fase gas dan bentuk partikel yaitu *spherical*.
 6. Memasukkan jumlah partikel yang akan diinjeksikan ke dalam *chamber* yaitu 1000 partikel.
 7. Memberikan kondisi batas pada dinding berupa *reflect*, *substrate* bidang datar berupa *escape*, dan *pore* dengan *trap*.
 8. Menampilkan hasil penyelesaian berupa vektor fluida, *particle tracking*, jumlah partikel terdeposisi dan distribusi kecepatan fluida serta melakukan analisa terhadap hasil yang diperoleh (*post-processing*).





Gambar III.2 Flowchart Simulasi Deposisi *Charged Particle*

III.4 Variabel Penelitian

Variabel penelitian ini adalah :

Variabel terikat :

- Jarak partikel dan substrate
- Jumlah partikel

Variabel bebas :

- Diameter partikel
- Kondisi fluida *carrier phase*
- Jumlah *pore*
- Muatan pada partikel



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

IV.1 Proses Deposisi dan Pemilihan Model pada CFD

Partikel yang digunakan pada proses deposisi *charged aerosol* partikel dalam simulasi ini adalah partikel Ag (*Silver*). Partikel ini disiapkan dengan cara mencampur Ag *sol* dan rhodamine 6G yang merupakan *fluorescence material*. Pada metode eksperimen, *fluorescence material* digunakan agar partikel Ag yang terdeposisi pada *substrate* dapat terlihat dengan jelas pada analisa *fluorencence microscopy*. Fluida yang digunakan sebagai *sheat air* adalah karbondioksida, sedangkan substratnya menggunakan AAO. (Kusdianto, 2014)

Proses deposisi secara eksperimen yang akan disimulasikan menggunakan tekanan operasi 1 atm dan suhu 373 K. Kondisi operasi 1 atm dipilih karena apabila kondisi deposisi pada keadaan vakum atau tekanan dibawah 1 atm, maka akan terdapat gaya tambahan yang timbul pada deposisi akibat gaya tarik yang muncul. Gaya tarik ini muncul dikarenakan perbedaan tekanan operasi dengan kondisi sekitar dimana pada *chamber* deposisi terdapat aliran keluar *chamber*. Selain itu gaya tarik yang timbul dapat membuat gaya elektrik menjadi terabaikan karena gaya elektrik mungkin dapat jauh lebih kecil daripada gaya tarik akibat perbedaan tekanan. Suhu 373 K digunakan karena pada proses deposisi ini partikel diinjeksikan pada kondisi *droplet* yaitu campuran partikel Ag, rhodamine 6G, dan air. Sehingga digunakan suhu 373 K agar air dapat teruapkan dan kondisi partikel saat akan terdeposisi adalah kondisi *dry* partikel. Tujuan dibuat pada kondisi *dry* partikel agar *substrate* tidak rusak akibat dari *droplet* yang masih memiliki diameter cukup besar. Sehingga pada simulasi ini digunakan kondisi tekanan 1 atm dan temperature 373 K. (Kusdianto, 2014)

Pada simulasi CFD, eksperimen ini digambarkan dengan menggunakan permodelan laminar dan turbulen untuk kondisi fluida. Setelah Nre diketahui permodelan *fluida* dapat dipilih. N_{Re}

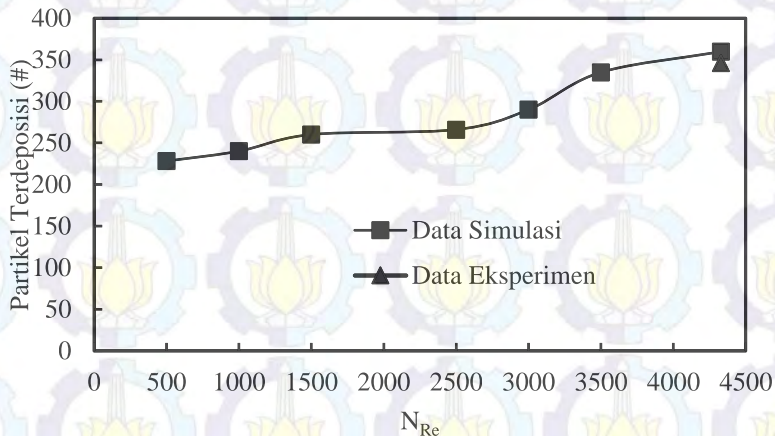
yang digunakan dari N_{Re} 500-30.000. Pada kondisi *fluida* laminar menggunakan permodelan laminar sedangkan untuk kondisi turbulen menggunakan standar k- ϵ turbulen model. Permodelan standar k- ϵ dipilih karena relatif stabil dan hanya menggunakan tambahan 2 persamaan untuk diselesaikan sehingga tidak akan membuat *run model* terlalu lama. Kelemahan dari model ini adalah tidak mampu untuk memodelkan *swirling flow*, namun karena pada deposisi ini tidak terdapat *swirling flow* sehingga masih dapat digunakan. Model ini memiliki akurasi hasil yang baik pada *range turbulen* yang besar dan *pressure gradient* yang kecil. (Ansys Fluent Theory Guide, 2013)

Untuk partikel, digunakan model *langrangian DPM* (*Discrete Phase Model*) dengan gaya yang bekerja pada partikel adalah *drag force* dan *electrical force*. Pendekatan model *langrangian* dapat digunakan pada partikel yang terdispersi pada *carrier phase* dan *tracking partikel* secara individual. Pendekatan ini dapat digunakan apabila *volume fraction* dari partikel maksimum adalah 10 % dari *carrier phase* sedangkan *volume fraction* pada deposisi ini adalah $2.8 \times 10^{-8} \%$ (Heiredal, 2010). Fase terdispersi pada permodelan ini juga dapat memodelkan terjadinya pertukaran momentum energi ataupun massa. Selain itu juga dapat digunakan untuk semua ukuran partikel dan juga memberikan informasi pada *boundary condition* sehingga cocok untuk model deposisi. Menurut El-Batsh (2002), permodelan ini sudah terbukti dapat dengan baik memodelkan deposisi *ash particle* pada *turbine cascades* dan disertai validasi dengan eksperimen.

IV.2 Validasi Hasil Eksperimen dengan Simulasi

Pada eksperimen deposisi partikel pada *porous structure* yang telah dilakukan oleh Kusdianto (2014), partikel yang digunakan adalah partikel yang berupa *droplet* yang merupakan campuran partikel Ag, rhodamine 6G, dan air. Partikel yang digunakan memiliki ukuran 7.6×10^{-5} mm dengan ukuran pore 5.5×10^{-3} mm serta memiliki kedalaman 1.3×10^{-1} mm. *Fluida carrier phase* memiliki flow rate 1 liter/menit dengan diameter jet

4 mm sehingga setelah dilakukan perhitungan, didapatkan N_{Re} fluida adalah 4329.



Gambar IV.1 Grafik Validasi Hasil Eksperimen dan Simulasi

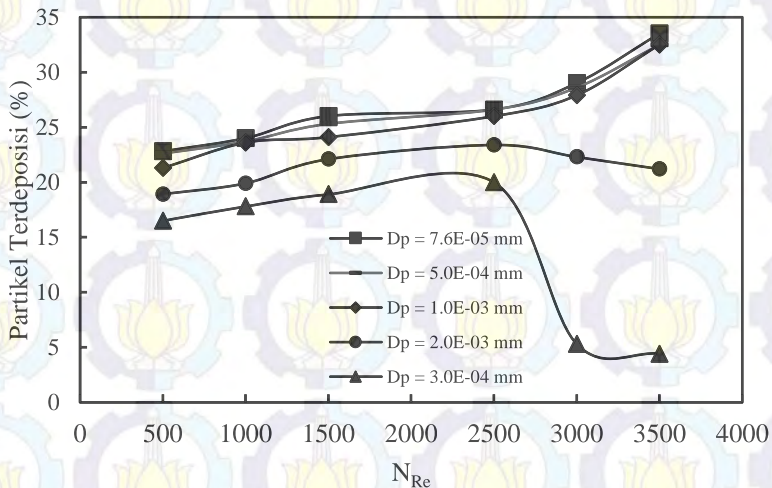
Pada data hasil eksperimen didapatkan bahwa luas partikel terdeposisi per luas *pore* adalah $2.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 / 1 \mu\text{m}^2$ (Kusdianto, 2014). Sehingga dengan diameter partikel yang diketahui yaitu $7.6 \times 10^{-5} \text{ mm}$ bisa didapatkan jumlah partikel yang terdeposisi. Luas area 1 *pore* yang digunakan pada simulasi adalah $1.573 \mu\text{m}^2$ sehingga didapatkan jumlah partikel yang terdeposisi di 1 *pore* pada hasil eksperimen yaitu 346 partikel. Sedangkan pada hasil simulasi didapatkan jumlah partikel adalah 360. Selisih antara hasil simulasi dan eksperimen ini adalah 3.76 %, sehingga simulasi ini masih cukup valid untuk digunakan mengambil data pada kondisi yang berbeda pada permodelan deposisi partikel.

IV.3 Ukuran Partikel Optimum pada Deposisi Partikel

Ukuran partikel memiliki peran penting dalam deposisi partikel, apabila ukuran partikel lebih besar daripada *pore* ataupun sama dengan *pore* tentu tidak akan terjadi deposisi. Apabila partikel semakin kecil maka semakin banyak yang dapat terdeposisi. Namun untuk membuat partikel berukuran sangat

kecil sangatlah sulit. Sehingga perlu diketahui ukuran partikel optimum yang dapat dideposisikan.

Pada simulasi dengan CFD ini ukuran partikel divariasikan dari ukuran 7.6×10^{-5} mm, 5.0×10^{-4} mm, 1.0×10^{-3} mm, 2.0×10^{-3} mm, dan 3.0×10^{-3} mm dengan ukuran *pore* adalah 5.5×10^{-3} mm. Jumlah partikel yang diinjeksikan adalah 1000 partikel. Pada gambar IV.2 dibawah ini dapat dilihat bahwa pada kondisi fluida laminar dan transisi jumlah partikel yang terdeposisi semakin banyak saat N_{Re} naik untuk partikel ukuran 7.6×10^{-5} mm sampai 1.0×10^{-3} mm.



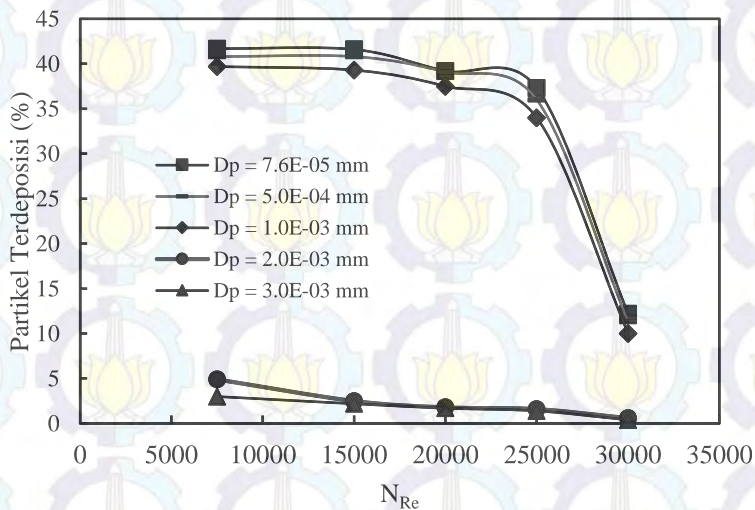
Gambar IV.2 Pengaruh Diameter Partikel pada *Range* N_{Re} 500-3500

Jumlah terbesar partikel terdeposisi adalah saat ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm, yaitu 360 pada N_{Re} 3500. Namun untuk ukuran partikel 2.0×10^{-3} mm dan 3.0×10^{-3} mm jumlah partikel terdeposisi maksimal pada keadaan N_{Re} 2500, pada N_{Re} diatas 2500 jumlah partikel terdeposisi semakin menurun. Hal ini dikarenakan ukuran partikel yang cukup besar bila dibandingkan dengan *pore*

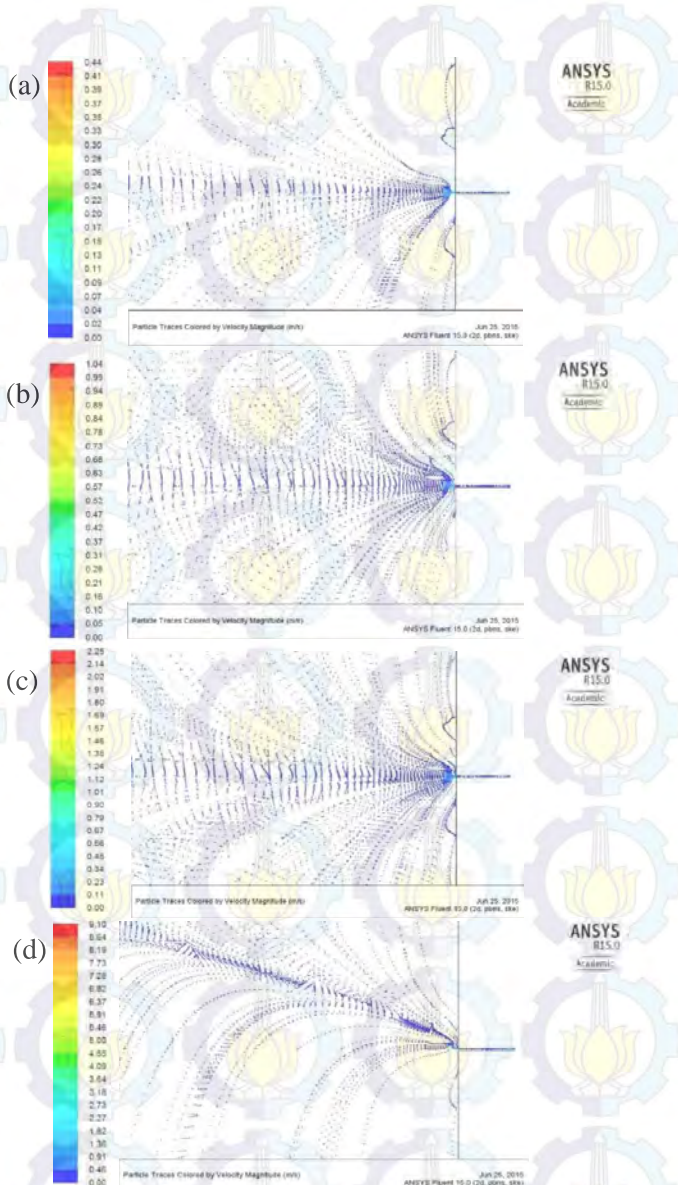
substrate sehingga hanya pada kondisi laminar dimana fluida bergerak lurus menuju *pore* diameter yang dapat terdeposisi optimum, saat transisi dimana mulai terdapat sangat sedikit turbulensi, pada ukuran partikel 2.0×10^{-3} mm dan 3.0×10^{-3} mm jumlah partikel terdeposisi mulai menurun.

Pada ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm sampai 1.0×10^{-3} mm memiliki selisih jumlah terdeposisi sangat kecil hingga deviasi masih dibawah 5%. Sehingga untuk deposisi pada kondisi laminar dan transisi untuk partikel sampai ukuran 1.0×10^{-3} mm masih optimum untuk digunakan atau tidak jauh dengan ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm.

Pada gambar IV.2 dapat dilihat bahwa pada Nre 7500 adalah titik maksimum jumlah deposisi partikel untuk setiap ukuran partikel. Pada Nre 15000 dapat dilihat sudah terjadi penurunan jumlah partikel yang terdeposisi hingga saat Nre 30000 adalah titik terendah jumlah partikel yang terdeposisi dan penurunan jumlah yang paling besar mencapai 70% dari jumlah partikel terdeposisi sebelumnya.

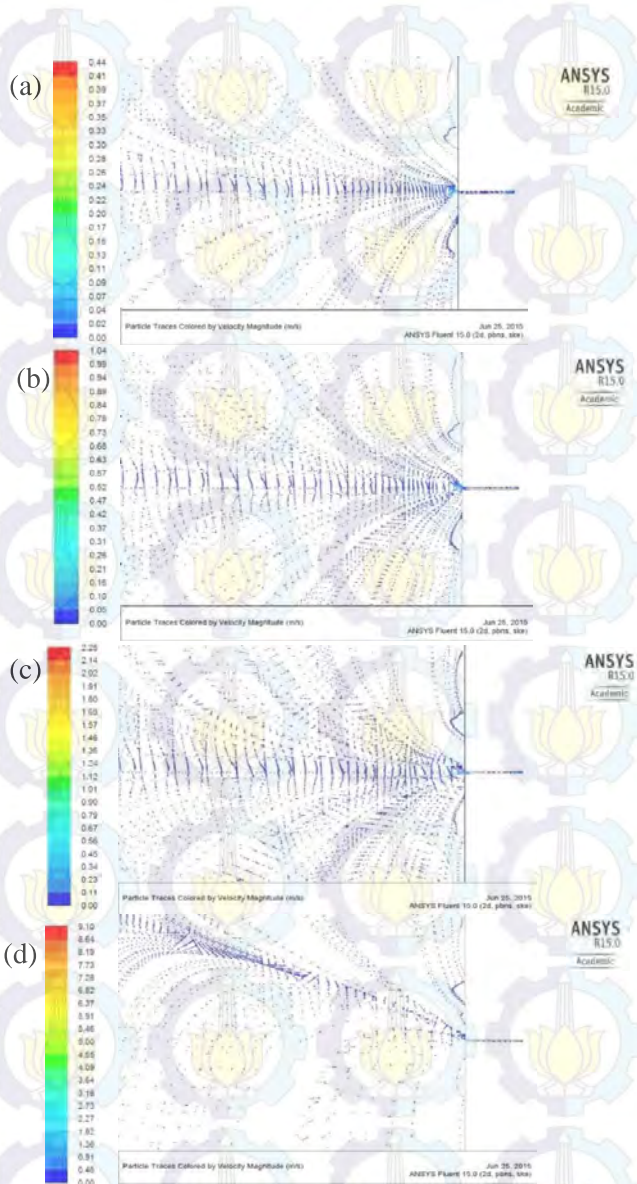


Gambar IV.3 Pengaruh Diameter Partikel pada Range N_{Re} 7500-30000



Gambar IV.4 Gerak Partikel untuk Ukuran Partikel 7.6×10^{-5} mm dengan N_{Re} : (a) 1500; (b) 3500; (c) 7500; (d) 30000

Dari gambar di atas dapat dilihat jumlah partikel yang terdeposisi untuk ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm pada aliran laminar (N_{Re} 1500) lebih sedikit daripada aliran transisi (N_{Re} 3500), dan terbanyak pada aliran turbulen (N_{Re} 7500), namun setelah itu menurun hingga paling sedikit pada N_{Re} 30000. Kecepatan partikel saat mendekati *pore* pada aliran laminar adalah 0.02 m/s, lebih kecil daripada aliran transisi dengan kecepatan 0.05 m/s sehingga pada saat kecepatan lebih besar jumlah partikel lebih banyak yang terdeposisi. Selain itu, pada aliran laminar dan transisi tidak terjadi turbulensi sehingga aliran partikel masih lurus dan tidak banyak mendapat gangguan. Pada aliran mulai turbulen yaitu N_{Re} 7500, partikel memiliki kecepatan 2 kali lebih besar daripada N_{Re} 3500 yaitu 0.11 m/s sehingga jumlah partikel terdeposisi semakin banyak yaitu mencapai 417 dan gangguan turbulensi juga masih sangat sedikit sehingga tidak terlalu mengganggu aliran partikel. Pada saat N_{Re} mulai naik ke 15000 dan sampai 25000 jumlah partikel terdeposisi semakin menurun karena mulai semakin banyak terdapat vorteks dan ketidakstabilan gerak partikel sampai pada N_{Re} 30000 dimana vorteks yang terjadi cukup besar pada tengah-tengah *chamber* sehingga jumlah partikel deposisi sangat menurun hingga 70 % dari jumlah sebelumnya.



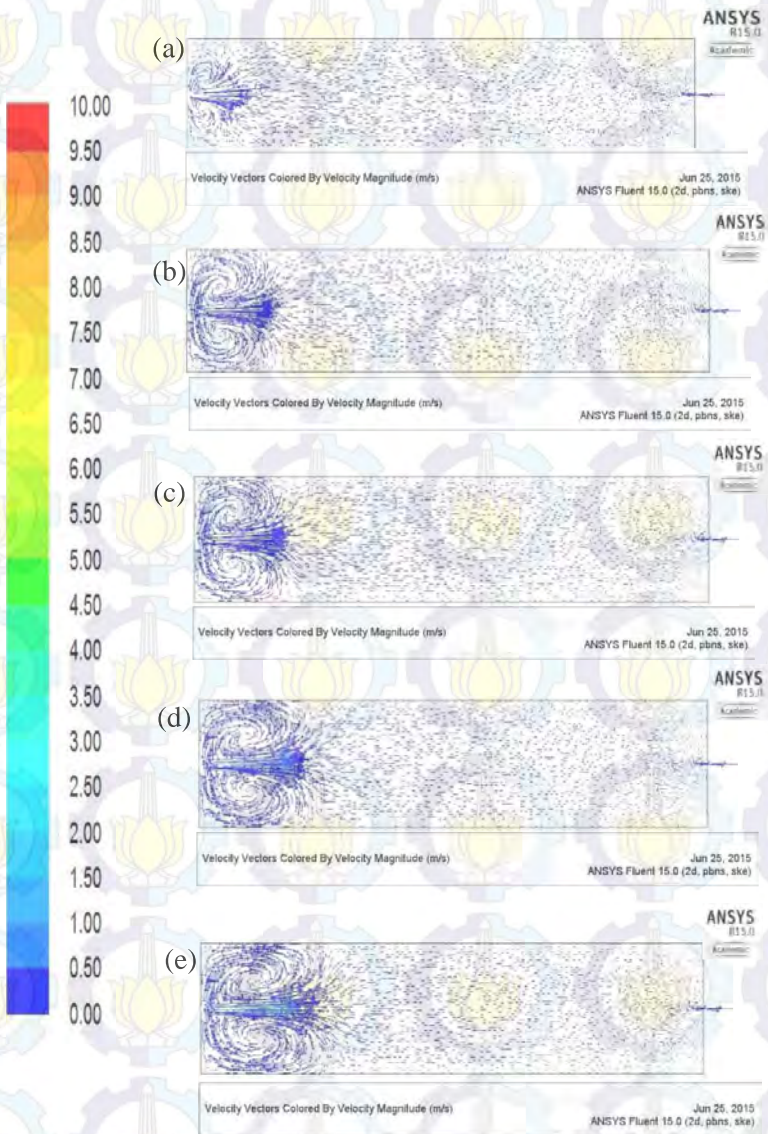
Gambar IV.5 Gerak Partikel untuk Ukuran Partikel 3.0×10^{-5} mm dengan N_{Re} : (a) 1500; (b) 3500; (c) 7500; (d) 30000

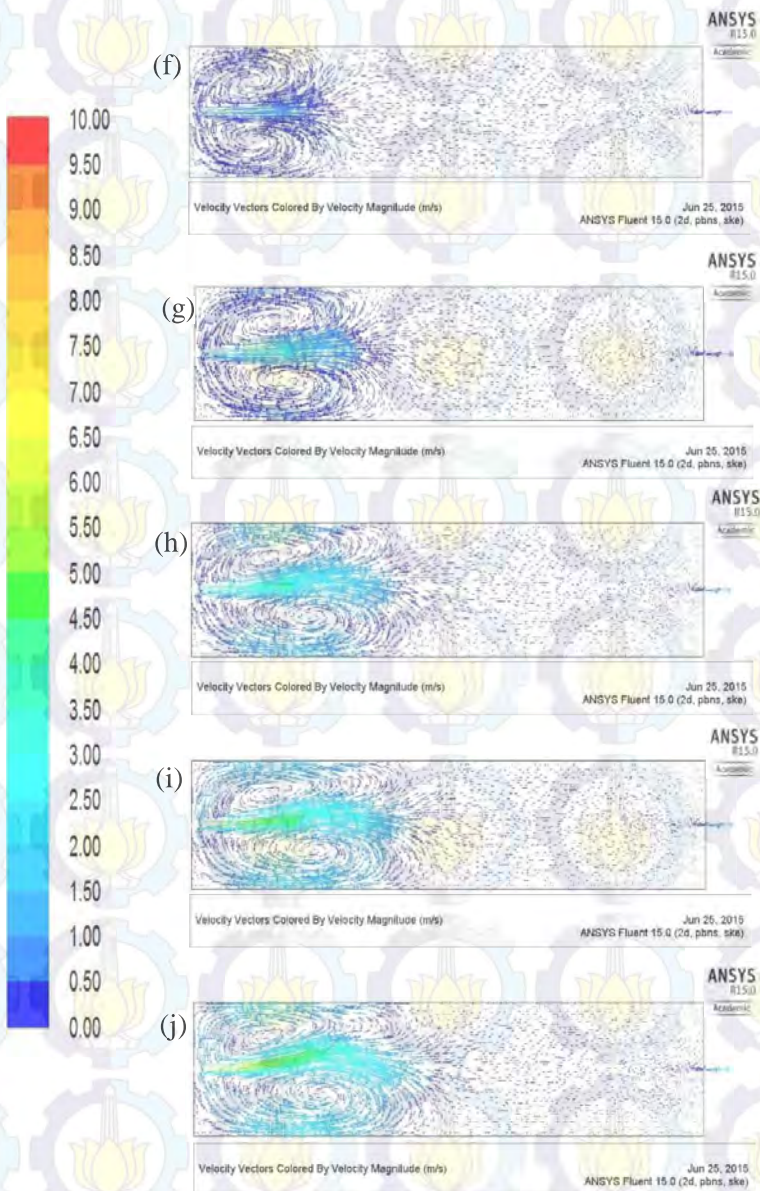
Pada gambar IV.5 di atas, ukuran partikel yang diamati adalah ukuran partikel 3.0×10^{-3} mm. Pada kondisi laminar (N_{Re} 1500) jumlah partikel yang terdeposisi paling banyak adalah dengan jumlah 189. Hal ini dapat dilihat dari gerak partikel lebih banyak berada di tengah *chamber* atau tepat berhadapan dengan *pore*, sedangkan saat N_{Re} meningkat, gerak partikel mulai semakin banyak terdapat pada sisi atas dan bawah *chamber* sehingga jumlah partikel terdeposisi semakin turun hingga saat N_{Re} 30000 dimana hampir sebagian besar gerak partikel berada di sisi atas *chamber* sehingga jumlah partikel yang terdeposisi sangat sedikit.

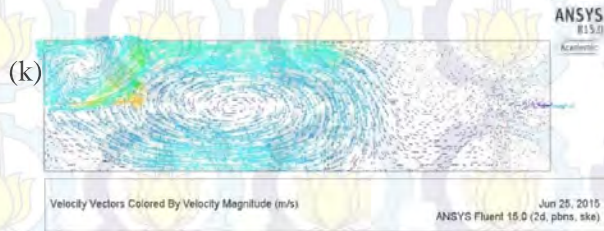
Pada ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm, 5.0×10^{-4} mm, dan 1.0×10^{-3} mm partikel yang terdeposisi masih optimum saat kondisi laminar, transisi, dan sedikit turbulen pada N_{Re} 7500 dan ketiga ukuran partikel hanya terdapat sedikit perbedaan jumlah yaitu dengan *deviasi* dibawah 5%. Sedangkan untuk ukuran partikel 2.0×10^{-3} mm dan 3.0×10^{-3} mm, partikel yang terdeposisi optimum pada kondisi laminar, saat transisi sudah mulai semakin kecil, hingga turbulen yang paling kecil.

IV.4 Kondisi Fluida *Carrier Phase* Optimum pada Deposisi Partikel

Seperti telah dibahas sebelumnya, kondisi fluida *carrier phase* sangat mempengaruhi deposisi partikel, munculnya vorteks atau pusaran dapat membuat partikel terperangkap pada pusaran. Semakin besar pusaran atau vorteks tentunya akan membuat semakin sedikit partikel yang terdeposisi karena konsentrasi partikel lebih tinggi pada pusaran yang terbentuk.



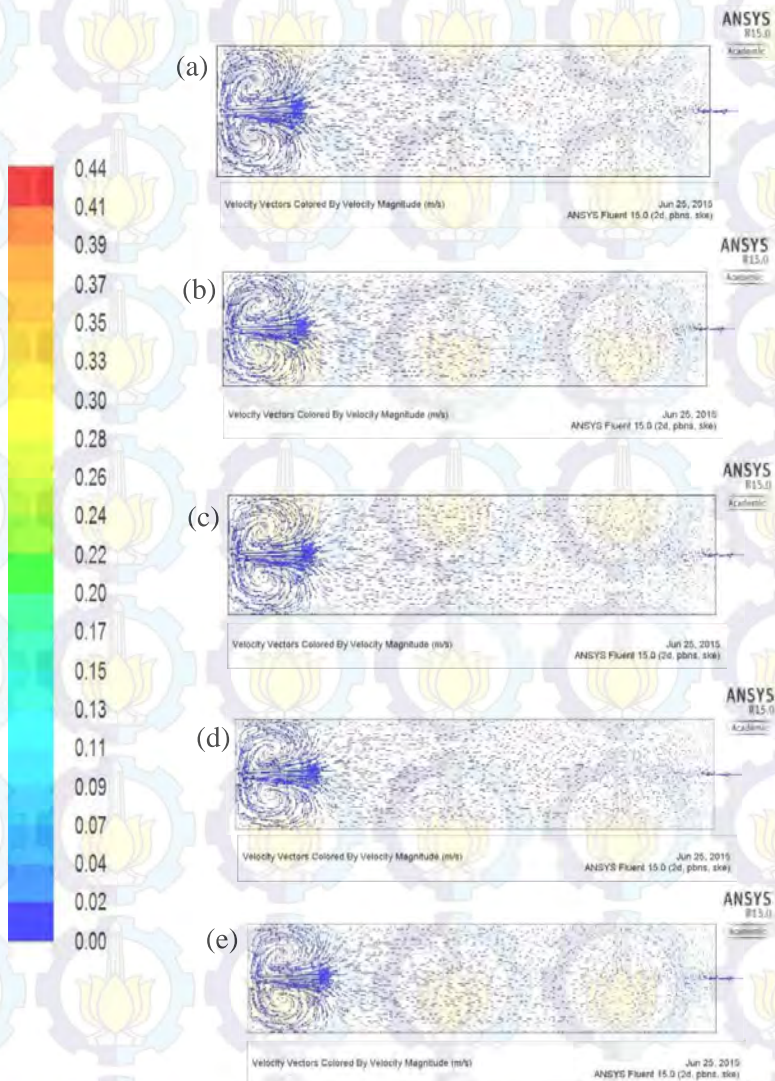




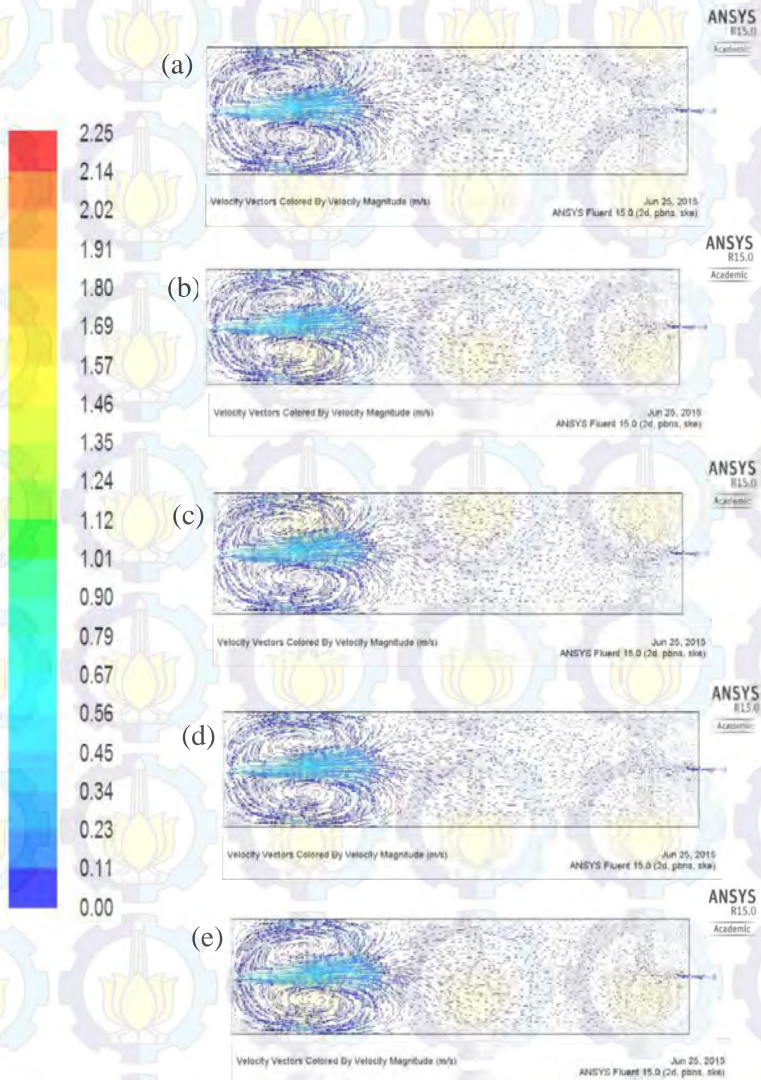
Gambar IV.6 Vektor Fluida untuk Ukuran Partikel 7.6×10^{-5} mm dengan N_{Re} : (a) 500; (b) 1000; (c) 1500; (d) 2500; (e) 3000; (f) 3500; (g) 7500; (h) 15000; (i) 20000; (j) 25000; (k) 30000

Pada gambar IV.6 di atas dapat terlihat dengan jelas pusaran yang terbentuk pada tiap N_{Re} fluida *carrier phase*. Pada N_{Re} 500, 1000, 1500, pusaran yang terbentuk sangat kecil hanya pada dekat *inlet* partikel dan fluida memiliki velocity 0.01-0.02 m/s setelah melewati titik pusaran sehingga masih cukup banyak terdapat partikel yang terdeposisi antara 228-260 partikel. Pada aliran transisi pusaran yang terbentuk semakin membesar namun masih memberikan *streamline* yang lurus mulai dari tengah *chamber* hingga *pore*. Fluida *carrier phase* memiliki kecepatan yang lebih tinggi daripada aliran laminar yaitu 0.04-0.05 m/s sehingga jumlah partikel terdeposisi masih terus meningkat hingga mencapai 335 partikel. Pada aliran turbulen dengan N_{Re} 7500 dimana jumlah partikel terbanyak yang dapat terdeposisi mencapai 417 dapat dilihat memiliki *velocity* fluida hingga 0.11 m/s dan bentuk pusaran dan keluaran partikel dan fluida masih mengikuti aliran transisi dan laminar. (Jin-Yook, 2013)

Pada N_{Re} 15000 hingga 25000 mulai terlihat partikel dan fluida mulai sedikit tertarik kesisi atas *chamber*. Semakin tinggi N_{Re} , semakin meningkat aliran fluida dan bentuk pusaran semakin membesar. Hal ini menyebabkan jumlah partikel terdeposisi menurun karena partikel terkonsentrasi atau terjebak pada pusaran yang cukup besar yang terjadi. Pada saat N_{Re} 30000, pusaran yang terbentuk sangat besar seperti terlihat pada tengah-tengah *chamber* sehingga partikel yang terdeposisi sangat menurun drastis.



Gambar IV.7 Vektor Fluida pada N_{Re} 1500 untuk Ukuran Partikel: (a) 7.6×10^{-5} mm; (b) 5.0×10^{-4} mm; (c) 1.0×10^{-3} mm; (d) 2.0×10^{-3} mm; (e) 3.0×10^{-3} mm

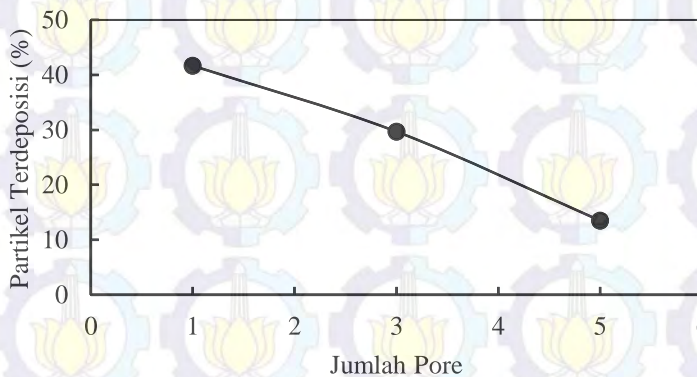


Gambar IV.8 Vektor Fluida pada N_{Re} 7500 untuk Ukuran Partikel: (a) 7.6×10^{-5} mm; (b) 5.0×10^{-4} mm; (c) 1.0×10^{-3} mm; (d) 2.0×10^{-3} mm; (e) 3.0×10^{-3} mm

Seperti yang terlihat pada gambar IV.7 dan gambar IV.8, diameter partikel tidak terlalu mempengaruhi gerak fluida. Pada diameter partikel yang lebih besar yaitu 5.0×10^{-4} mm, 1.0×10^{-3} mm, 2.0×10^{-3} mm, hingga 3.0×10^{-3} mm memiliki gerak fluida yang sangat mirip dengan ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm. Hal ini dikarenakan *volume fraction* diameter partikel terbesarpun masih sangat kecil yaitu 2.88×10^{-7} sehingga besar diameter partikel tidak terlalu mempengaruhi gerak fluida *carrier phase*. Fluida baru akan terpengaruh pada partikel apabila *volume fraction* partikel mencapai 10%. (Heiredal, 2010)

IV.5 Pengaruh Jumlah *Pore* terhadap Deposisi Partikel

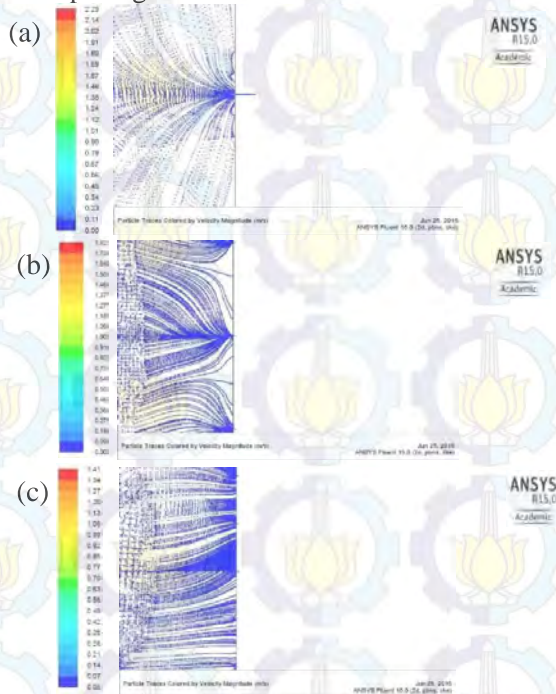
Pada pembahasan sebelumnya didapatkan bahwa fluida yang optimum yang dapat menghasilkan deposisi partikel terbanyak terdapat pada kondisi N_{Re} 7500 dengan ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm. Dan jumlah partikel yang diinjeksikan berjumlah 1000 tidak mempengaruhi gerak fluida sebagai *carrier phase*. Sehingga pada variabel jumlah *pore* digunakan kondisi optimum dari pembahasan sebelumnya.



Gambar IV.9 Pengaruh Jumlah *Pore* Terhadap Jumlah Partikel Terdeposisi

Seperti yang terlihat pada Gambar IV.9, semakin banyak jumlah *pore* maka akan menghasilkan jumlah partikel terdeposisi yang semakin menurun. Seharusnya semakin banyak *pore* partikel yang terdeposisi semakin banyak. Pada simulasi ini menghasilkan jumlah partikel terdeposisi yang menurun dimana pada jumlah *pore* 1 terdapat 417 partikel, pada 3 *pore* menjadi 297 dan pada 5 *pore* menjadi hanya 135.

Hal ini dapat disebabkan oleh letak *pore* yang tidak terpusat atau tidak berada di titik-titik yang berdekatan. Pada jumlah *pore* 3 dimana memiliki total panjang antar *pore* adalah 12.48 mm, sedangkan pada jumlah *pore* 5 memiliki total panjang antar *pore* adalah 16.64 mm. Sehingga gerakan partikel menjadi menyebar seperti yang terlihat pada gambar IV.10 di bawah ini.



Gambar IV.10 Gerak Partikel pada Jumlah *Pore* : (a) 1 *pore*;
(b) 3 *pore*; (c) 5 *pore*

Pada jumlah *pore* 1, seluruh partikel terdorong oleh gerak fluida yang menuju pusat *pore* dimana hanya terdapat 1 *pore* di tengah. Sedangkan pada jumlah *pore* 3 gerakan partikel merata di ketiga *pore* dan fluida mulai terbagi saat mendekati *pore*. Hal ini menyebabkan mulai banyak partikel yang terdeposisi pada *flat surface*, dan tidak pada *pore*, sehingga jumlah partikel terdeposisi menjadi menurun. Pada jumlah *pore* 5 gerakan partikel semakin terbagi yang menuju *pore*. Sehingga semakin banyak partikel yang terdeposisi pada *flat surface* akibat dari gerak fluida yang mendorong partikel menuju *pore* terbagi pada ke 5 *pore*.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa apabila jumlah *pore* partikel dibuat semakin banyak, sebaiknya diletakkan saling berdekatan dan berada di pusat *chamber* sehingga jumlah partikel yang terdeposisi semakin banyak, apabila dibuat semakin menyebar, jumlah partikel yang terdeposisi akan semakin menurun.

IV.6 Pengaruh *Electric Force* pada Deposisi Partikel

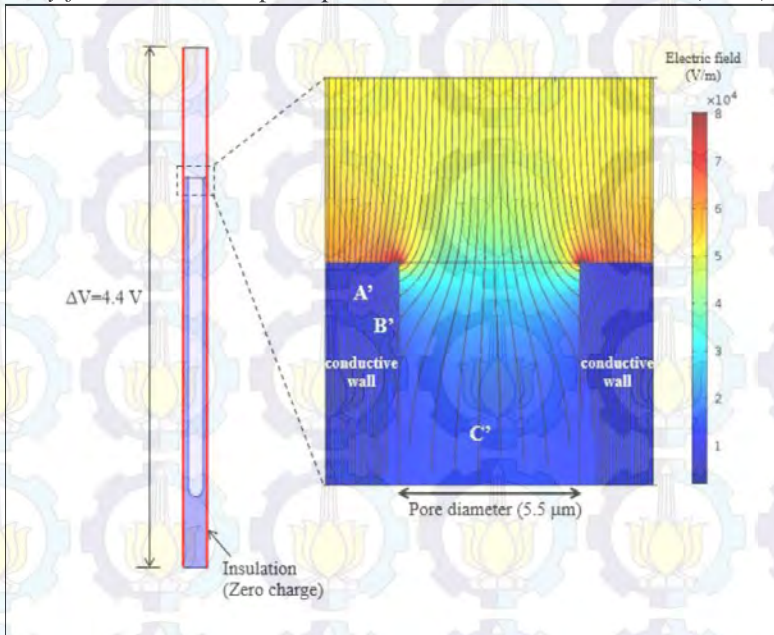
Gaya elektrik adalah salah satu gaya tambahan yang dapat membuat deposisi partikel semakin banyak karena beda muatan antara *pore* dan partikel. Apabila beda muatan sangat besar, gaya elektrostatis dapat 1000 kali lebih besar daripada gaya gravitasi (Hinds,1999). Pada model deposisi ini gaya yang digunakan adalah gaya coulomb sebagai *fundamental equations* untuk gaya elektrik. Gaya coulomb adalah gaya tarik menarik atau tolak menolak yang timbul akibat beda muatan antara 2 titik baik itu partikel dan partikel ataupun partikel dengan suatu objek. Persamaan gaya coulomb adalah :

$$F_e = q_p \times E \quad (\text{Park}, 2013)$$

Dimana E atau *electric field strength* pada 1 titik *point*, q_p adalah muatan pada partikel.

Nilai *charged particle* adalah 3.8×10^{-16} C. Untuk nilai *electric field* pada tiap titik akan berbeda, semakin dekat jarak dan besar muatan akan membuat semakin besar *electric field*. Sehingga

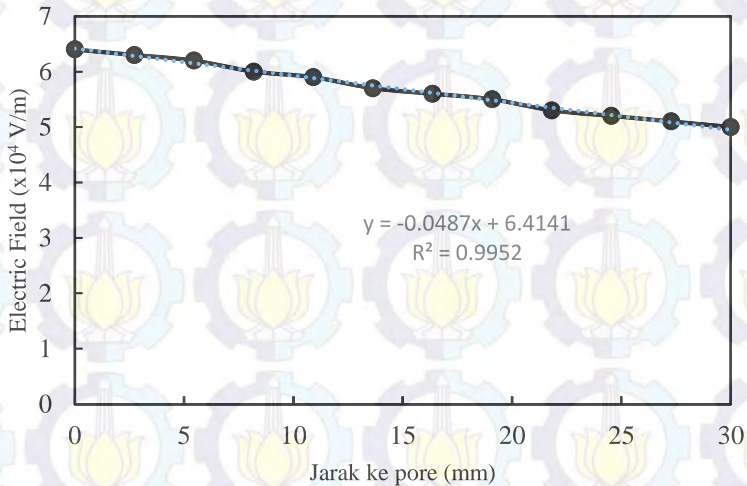
pada simulasi ini selain harus sudah mengetahui muatan pada partikel, perlu diketahui juga melalui suatu persamaan nilai *electric field strength* di masing-masing titik sehingga dapat memberikan *body force* tambahan pada partikel sesuai rumus dari Park (2013).



Gambar IV.11 Hasil Simulasi dengan COMSOL Mengenai *Electric Field Strength* pada Setiap Titik di Satu Pore (sumber: Kusdianto et al., 2014)

Pada simulasi dengan CFD diperlukan data mengenai *electric field strength* di setiap titik agar dapat ditulis menjadi suatu persamaan fungsi antara jarak dan *electric strength*. Sehingga dapat digunakan pada UDF yang akan ditulis. Apabila nilai *electric strength* ditetapkan atau constant maka akan terjadi ketidaksesuaian dengan teori coulomb force dimana *electric strength* di tiap titik berbeda.

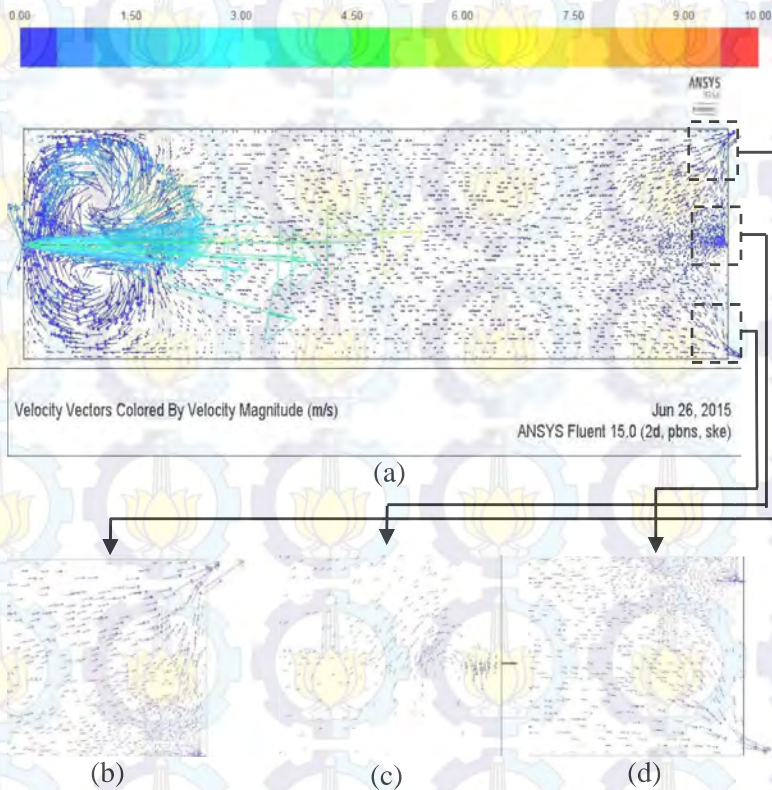
Dari data dengan simulasi COMSOL didapatkan *electric field strength* di tiap titik seperti yang terlihat pada Gambar IV.5. Pada Gambar IV.6 adalah data di setiap titik dari hasil simulasi dengan COMSOL. Dapat terlihat saat jarak titik dengan substrate 0 mm, maka *electric field* memiliki nilai tertinggi, semakin jauh akan semakin kecil.



Gambar IV.12 Nilai *Electric Field* pada Tiap Titik Hasil Simulasi COMSOL

Setelah data-data yang diperlukan untuk menulis UDF lengkap, maka selanjutnya dilakukan penulisan *coding*, setelah itu melakukan *interpreted* UDF, dan *hooking* pada *body force* di dalam menu *Discreate Phase Model*.

Pada simulasi dengan CFD dilakukan variasi terhadap muatan yang diberikan pada partikel. Untuk keadaan chamber sedikit diubah dimana diberikan keluaran atau outflow untuk fluida pada sisi atas dan bawah substrat.

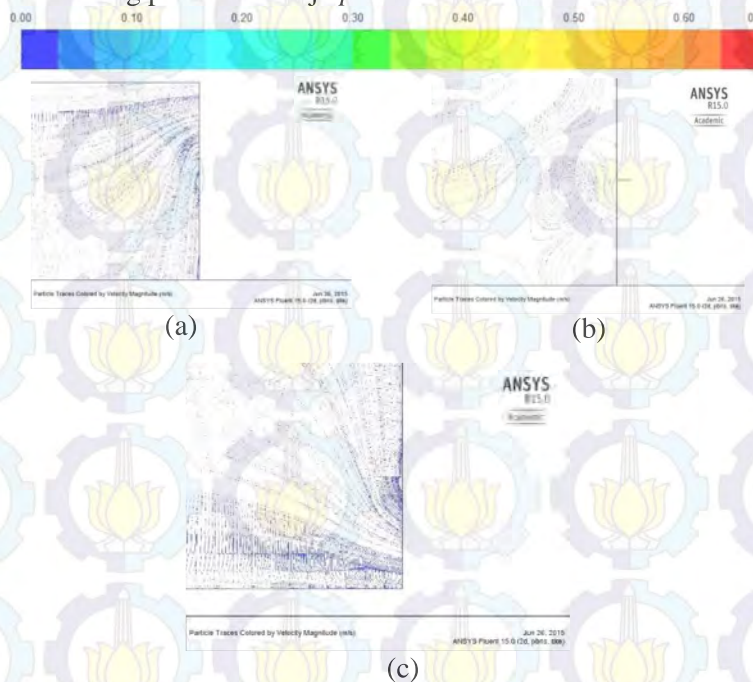


Gambar IV.13 Vektor Fluida dengan Adanya *Outflow* dan Partikel Tanpa Muatan dengan Bagian : (a) *Overall*; (b) *Outflow Atas*; (c) *Dekat Pore*; (d) *Outflow Bawah*

Dapat terlihat dari gambar IV.13 di atas yaitu gambar vektor fluida dengan N_{re} 3500 (kondisi eksperimen) dengan ukuran partikel adalah 7.6×10^{-5} mm dan terdapat 1 *pore* di pusat *chamber*. Apabila terdapat *outflow* pada *chamber* deposisi, seluruh fluida memiliki arah keluar ke arah *outflow* dan kondisi fluida pada dekat *pore*, tidak mengarah ke *pore* melainkan terjadi pusaran dan arah

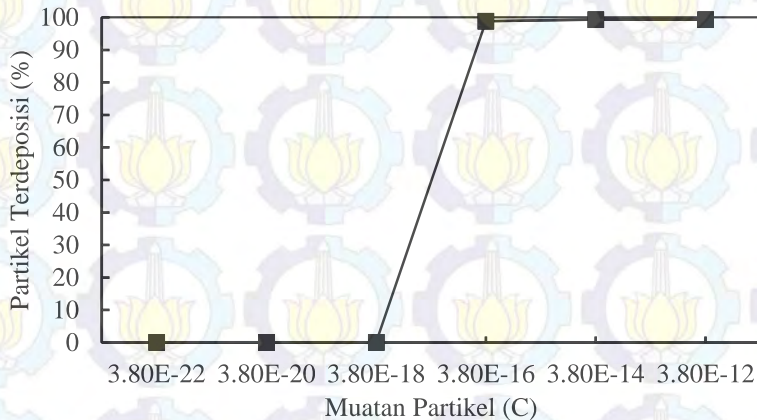
vektor ke *outflow* bagian atas dan bawah. Hasil jumlah partikel yang terdeposisi adalah 0 dan seluruh partikel keluar melalui *outflow*.

Seperti penjelasan pada sub bab IV.4 dimana gerakan partikel mengikuti gerak fluida karena *volume fraction* partikel yang sangat kecil. Sehingga gerakan partikel pada kondisi dengan adanya outflow juga mengikuti gerak fluida seperti yang terlihat pada tabel IV.8. Untuk dapat mendeposisikan partikel ke *pore* pada kondisi *chamber* seperti ini digunakan gaya electric untuk mendorong partikel menuju *pore*



Gambar IV.14 Gerak Partikel dengan Adanya *Outflow* dan Partikel Tanpa Muatan dengan Bagian : (a) *Outflow* Atas; (b) Dekat *Pore*; (c) *Outflow* Bawah

Pada simulasi, gaya elektrik yang diberikan adalah gaya coulomb dan variabel muatan pada partikel yaitu 3.8×10^{-12} C, 3.8×10^{-14} C (data eksperimen), 3.8×10^{-16} C, 3.8×10^{-18} C, 3.8×10^{-20} C, dan 3.8×10^{-22} C. Untuk UDF yang digunakan terdapat pada Lampiran..

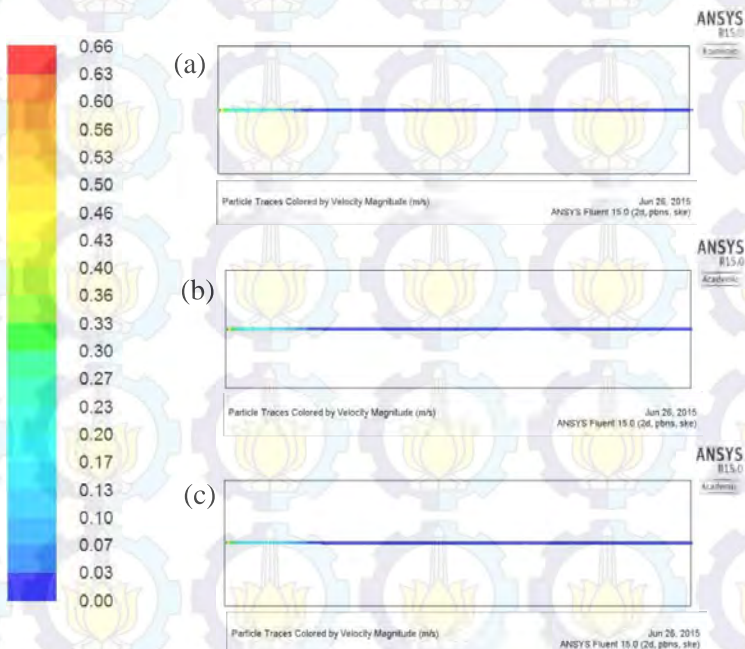


Gambar IV.15 Pengaruh Muatan pada Partikel Terhadap Jumlah Partikel Terdeposisi

Pada saat partikel tidak diberikan muatan seperti yang terlihat pada gambar IV.14, tidak ada partikel yang terdeposisi pada *pore*, pada saat *pore* diberikan *charges* sebesar -3.8×10^{-14} C dan partikel diberikan muatan sebesar 3.8×10^{-22} C sampai 3.8×10^{-18} C jumlah partikel yang terdeposisi hanya berjumlah 1. Dan gerakan partikel masih mengikuti gerak fluida seperti gambar IV.14.

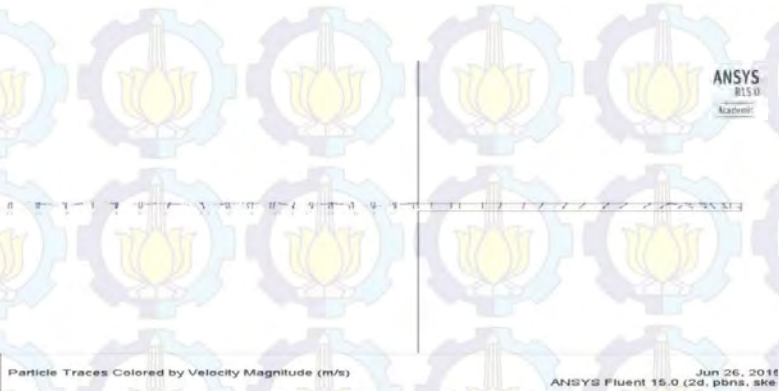
Ketika muatan pada partikel semakin dinaikkan yaitu berjumlah 3.8×10^{-16} C jumlah partikel terdeposisi naik menjadi 988, atau hampir 98.8% dari partikel yang diinjeksikan. Dan gerakan partikel tidak mengikuti gerak fluida, namun mengikuti garis elektrik yang bergerak lurus menuju *pore*. Saat muatan dinaikkan kembali menjadi 3.8×10^{-14} C sampai 3.8×10^{-12} C jumlah

partikel yang terdeposisi naik kembali menjadi 993 atau 93.3%, dan setelah itu tetap konstan di angka 993.

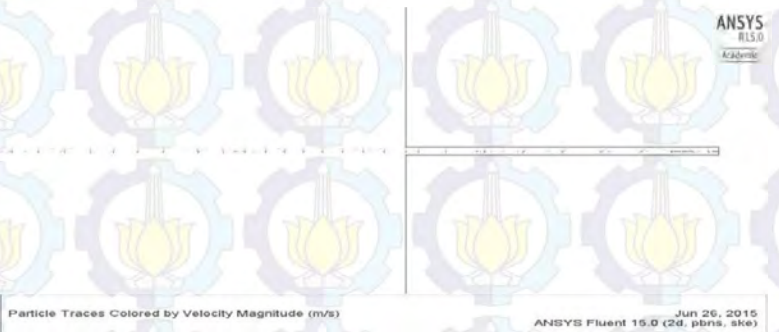


Gambar IV.16 Gerak Partikel untuk Muatan Partikel :
(a) $3.8 \times 10^{-16} \text{ C}$; (b) $3.8 \times 10^{-14} \text{ C}$; (c) $3.8 \times 10^{-12} \text{ C}$

Dari gambar IV.16 di atas, secara *overall* tidak terlihat perbedaan antara *charged* pada partikel namun apabila dibandingkan dengan tanpa *charged* akan sangat terlihat dimana saat diberikan *charged*, partikel dapat fokus pada *pore* dan efisiensi deposisi mencapai diatas 98 %, bahkan lebih baik dari kondisi saat chamber tertutup.



Gambar IV.17 Gerak Partikel di *Pore* untuk Muatan Partikel Sebesar 3.8×10^{-16} C



Gambar IV.18 Gerak Partikel di *Pore* untuk Muatan Partikel Sebesar 3.8×10^{-14} C

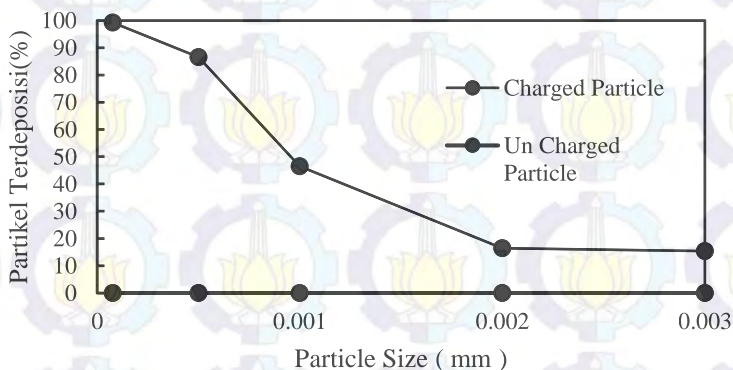
Seperti yang terlihat pada gambar IV.17, jumlah partikel yang terdeposisi berjumlah 988. Apabila dibandingkan dengan gambar IV.18, maka gerak partikel masih lebih sedikit tersebar dibanding dengan gambar IV.18 sehingga jumlah partikel yang terdeposisi pada pore adalah 988, *escaped* berjumlah 8 (partikel pada *substrate* datar) dan *outflow* berjumlah 4 partikel. Sedangkan saat charged 3.8×10^{-14} C jumlah partikel terdeposisi pada pore adalah 993 dan escape 7 dan tidak ada partikel yang keluar melalui *outflow*.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa perbedaan *charged* pada partikel dapat membuat partikel terdeposisi dengan efisiensi tinggi sekalipun diberikan tempat keluaran fluida. Sehingga apabila dilakukan secara injeksi partikel dan fluida secara continuous akan sangat baik dan semakin banyak partikel yang dapat terdeposisi pada pore. Jumlah *charged* paling optimum pada partikel adalah sebesar 3.8×10^{-14} C.

IV.7 Pengaruh Ukuran *Charged* Partikel pada Deposisi Partikel

Setelah didapat hasil pada pembahasan IV.6 bahwa partikel dapat terdeposisi pada pore apabila memiliki muatan lebih besar dari 3.8×10^{-16} C, dimana deposisi partikel terbanyak adalah saat kondisi N_{Re} 3500, ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm dan dengan *charged* pada partikel sebesar 3.8×10^{-14} C.

Ukuran partikel memiliki pengaruh yang cukup besar pada deposisi partikel. Pada simulasi selanjutnya dilakukan variasi terhadap ukuran partikel yaitu 7.6×10^{-5} mm, 5.0×10^{-4} mm, 1.0×10^{-3} mm, 2.0×10^{-3} mm, dan 3.0×10^{-3} mm. Dan variabel yang ditetapkan adalah *charged* pada partikel sebesar 3.8×10^{-14} C dan N_{Re} Fluida 3500.



Gambar IV.19 Pengaruh Ukuran *Charged* Partikel pada Deposisi Partikel

Seperti yang terlihat pada gambar IV.19, semakin besar partikel, jumlah partikel yang terdeposisi semakin menurun. Hal ini disebabkan oleh menurunnya nilai *surface charge density* dengan semakin naiknya ukuran partikel. Berikut ini pada Tabel IV.1 adalah jumlah *charged density* masing-masing ukuran partikel.

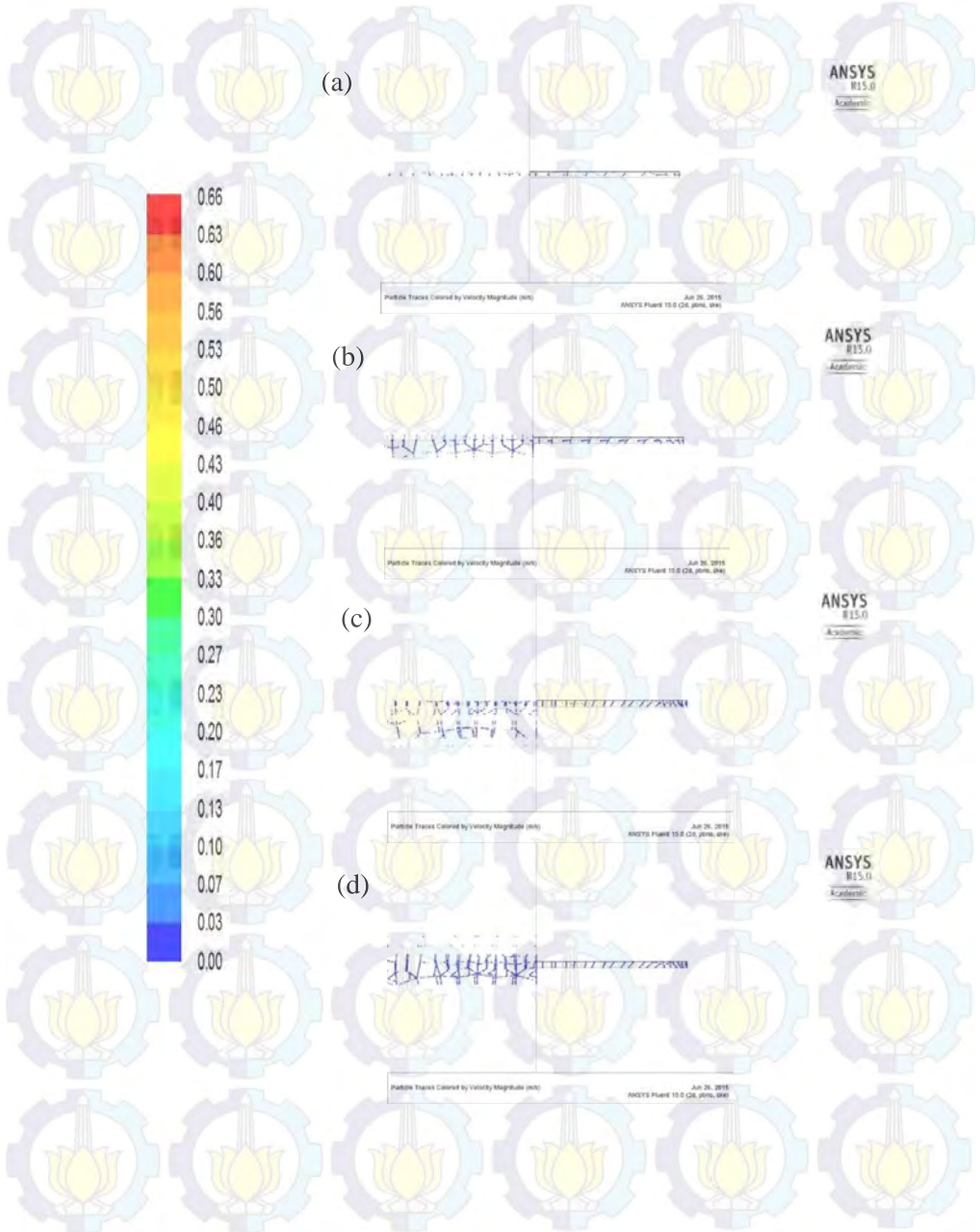
Tabel IV.1 *Charged Density* pada Tiap Ukuran Partikel.

Ukuran Partikel (mm)	<i>Surface Charged Density</i> (C/m ²)
7.6×10^{-5}	2.095
5.0×10^{-4}	0.048
1.0×10^{-3}	0.012
2.0×10^{-3}	0.003
3.0×10^{-3}	0.001

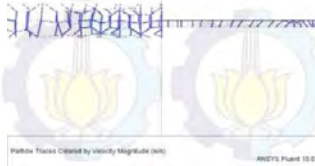
Apabila *surface charged density* pada partikel menurun, maka partikel akan sedikit mengikuti gerak fluida dan membuat partikel mulai tidak mengikuti arah electric field karena nilai electric field yang menurun berdasarkan persamaan Gauss. Pada persamaan Gauss nilai *electric field* akan turun apabila charged density pada partikel menurun. Sehingga partikel yang terdeposisi akan semakin menurun. (Yao,2009)

Pada Gambar IV.20 juga dapat dilihat gerakan partikel menuju pore, dimana keseluruhan ukuran partikel memiliki charged yang sama besar, sama sama memiliki gerakan yang mirip. Dapat terlihat pula semakin besar ukuran partikel semakin banyak partikel yang terdeposisi tidak pada pore. Gerakan partikel semakin melebar dari lebar pore. Ketika ukuran partikel 0.001 dan semakin besar dapat terlihat juga bahwa lebar pore ditutupi partikel karena ukuran yang semakin membesar, sehingga jumlah partikel terdeposisi semakin menurun.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar ukuran partikel, jumlah partikel terdeposisi akan semakin menurun karena *charged density* yang menurun dan *pore* yang semakin tertutup karena partikel yang cukup besar.



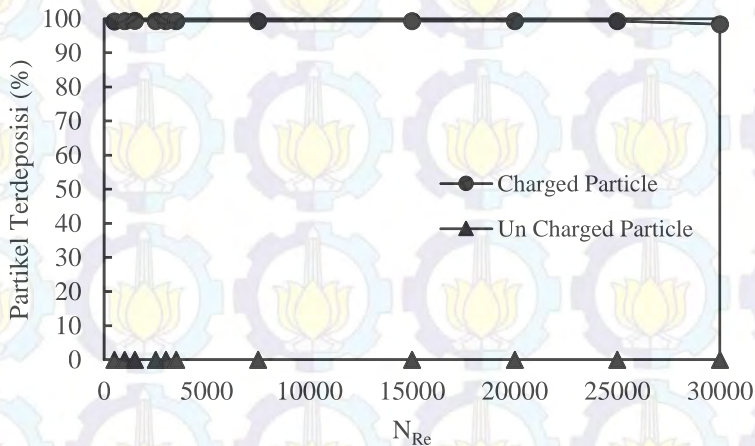
(e)



Gambar IV.20 Gerak Partikel untuk Ukuran Partikel:
 (a) 7.6×10^{-5} mm; (b) 5.0×10^{-4} mm; (c) 1.0×10^{-3} mm;
 (d) 2.0×10^{-3} mm; (e) 3.0×10^{-3} mm

IV.8 Pengaruh N_{Re} Fluida pada Deposisi *Charged Particle*

Setelah didapatkan charged optimum, dan ukuran partikel optimum, maka selanjutnya akan disimulasikan perbedaan kondisi fluida pada deposisi charged particle. Variabel yang digunakan adalah N_{Re} 500, 1000, 1500, 2500, 3000, 3500, 7500, 15000, 20000, 25000, dan 30000. Untuk variabel yang ditetapkan adalah charged pada particle yaitu 3.8×10^{-14} C, ukuran partikel 7.6×10^{-5} mm.

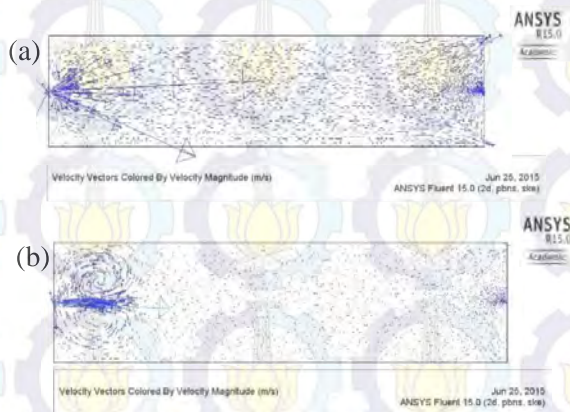


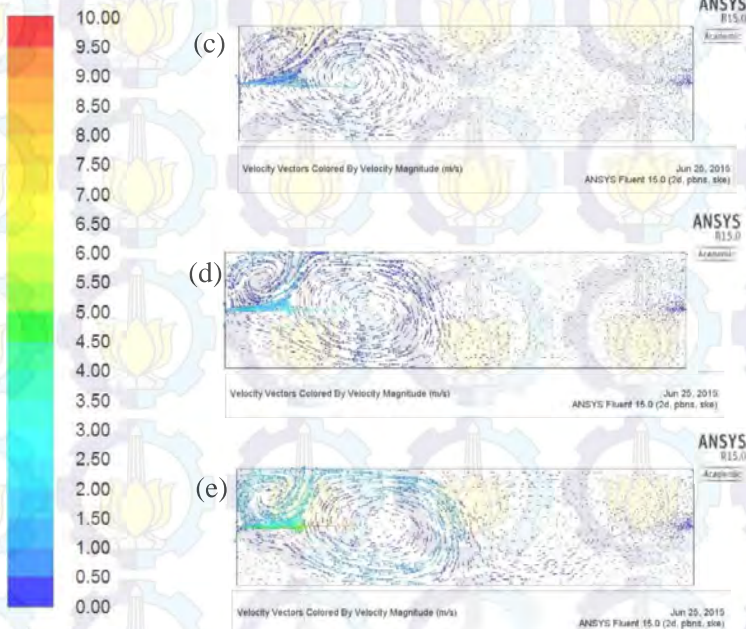
Gambar IV.21 Pengaruh Aliran Fluida pada Deposisi Partikel

Pada Gambar IV.21 dapat dilihat pada saat N_{Re} berada pada kondisi laminar deposisi *charged particle* terus naik hingga N_{Re} 1500 (kondisi laminar), dan setelah itu sedikit turun dan konstan, lalu pada N_{Re} 30000 turun menjadi 984 partikel.

Ketika partikel sudah diberikan muatan dan terdapat tempat keluaran fluida, dapat terlihat bahwa kondisi laminar adalah kondisi terbaik untuk deposisi *charged particle*. Dimana mencapai jumlah 994 pada saat N_{Re} 1500, ini adalah jumlah partikel terdeposisi yang paling banyak diantara kondisi manapun. Pada saat aliran transisi hingga turbulen N_{Re} 25000 jumlah partikel terdeposisi masih konstan, dan baru turun saat N_{Re} 30000. (Kusdianto, 2014)

Apabila dilihat selisih antara jumlah partikel terbanyak dan paling sedikit yang hanya memiliki selisih 10 partikel maka dapat disimpulkan bahwa kondisi fluida hanya sedikit mempengaruhi jumlah partikel terdeposisi, karena gaya electric yang memiliki peran sangat dominan pada *charged particle*.





Gambar IV.22 Vektor Fluida pada *Chamber* untuk N_{Re} :
 (a) 1500; (b) 3500; (c) 7500; (d) 15000; (e) 30000

Dari Gambar IV.22 dapat dilihat pada saat N_{Re} 1500 vorteks yang terbentuk sangat kecil, dan luas vorteks di dekat *pore* juga masih kecil, namun apabila semakin cepat aliran fluida, vorteks yang terbentuk semakin membesar baik pada sisi *inlet jet* ataupun di dekat *pore*. Sehingga dapat dijelaskan bahwa semakin kecil vorteks yang terbentuk dan aliran fluida yang semakin tenang, maka jumlah partikel yang dapat terdeposisi akan semakin banyak, karena gaya elektrik yang diperlukan akan lebih sedikit untuk melawan aliran fluida.

BAB V PENUTUP

V.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Untuk proses deposisi partikel sebelum diberi muatan, keadaan optimum adalah saat diameter partikel 7.6×10^{-5} mm untuk ukuran *pore* $5.5 \mu\text{m}$ dan fluida memiliki N_{Re} 7500.
2. Semakin banyak jumlah *pore*, jumlah partikel terdeposisi semakin menurun. Hal ini dikarenakan letak antar *pore* yang terpisah dengan jarak yang sama, sebaiknya *pore* diletakkan saling berdekatan dan berada di pusat *chamber* sehingga jumlah partikel yang terdeposisi semakin banyak.
3. Untuk proses deposisi partikel bermuatan, jumlah muatan optimum adalah 3.8×10^{-14} C, diameter partikel 7.6×10^{-5} mm, dan fluida memiliki N_{Re} 1500.
4. Pada keadaan partikel yang bermuatan, semakin besar ukuran partikel, jumlah partikel terdeposisi akan semakin menurun karena *charged density* yang menurun dan *pore* yang semakin tertutup karena partikel yang cukup besar

V.2 Saran

Dari jalannya percobaan yang telah dilakukan, dapat disarankan untuk peneliti selanjutnya:

1. Melakukan penelitian ini dengan jumlah *pore* yang lebih banyak dengan jarak yang dekat antar *pore*-nya.
2. Menuliskan rumus *image force* dan gaya dipol untuk UDF.
3. Permodelan 2D ini dapat dikembangkan menjadi 3D untuk dapat mengetahui kondisi aliran di beberapa bidang pengamatan dan diberikan perpanjangan *outflow* agar dapat mengetahui kondisi fluida saat *outflow*

Halaman ini Sengaja Dikosongkan

APPENDIKS

A.1. N_{Re} Fluida *Carrier Phase*

Pada simulasi ini, digunakan variasi N_{Re} untuk aliran laminar, transisi, dan turbulen untuk mengetahui bagaimana hubungan antara N_{Re} fluida dengan jumlah partikel yang terdeposisi. Dimana rumus N_{Re} adalah sebagai berikut:

$$N_{Re} = \frac{\rho \times D \times v}{\mu} \dots\dots\dots(1)$$

dengan D = diameter ekivalen *chamber*

ρ = densitas fluida

μ = viskositas fluida

v = kecepatan fluida

Pada kondisi simulasi ini ($P = 1 \text{ atm}$, $T = 373 \text{ K}$) dengan fluida adalah CO_2 , digunakan data sebagai berikut:

$D = 25 \text{ mm} = 0.025 \text{ m}$

$\rho = 1.7878 \text{ kg/m}^3$

$\mu = 1.37 \times 10^{-5}$

N_{Re} yang digunakan pada simulasi ini ditetapkan sehingga mencakupi untuk aliran laminar, transisi, dan turbulen. Sehingga kecepatan fluida yang digunakan dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

$$v = \frac{N_{Re} \times \mu}{\rho \times D} \dots\dots\dots(2)$$

Diambil contoh dengan $N_{Re} 500$, maka $v = \frac{N_{Re} \times \mu}{\rho \times D}$

$$\begin{aligned} v &= \frac{N_{Re} \times \mu}{\rho \times D} \\ v &= \frac{500 \times 1.37 \times 10^{-5}}{1.7878 \times 0.025} \\ v &= 0.1533 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Untuk hasil perhitungan kecepatan fluida dengan variasi N_{Re} disajikan pada Tabel A.1

Tabel A.1 Hasil Perhitungan Kecepatan Fluida

N _{Re}	v (m/s)	N _{Re}	v (m/s)
500	0.1533	7500	2.2989
1000	0.3065	15000	4.5978
1500	0.4598	20000	6.1304
2500	0.7663	25000	7.6630
3000	0.9196	30000	9.1957
3500	1.0728		

A.2. Volume Fraction Partikel pada Fluida Carrier Phase.

Data yang digunakan pada simulasi ini adalah sebagai berikut:

Diameter Partikel : 76 nm = 0.000076 mm

Jumlah Partikel : 1000

Panjang Chamber: 100 mm

Lebar Chamber : 25 mm

Partikel diasumsikan *monodisperse* dimana memiliki bentuk *spherical* dan seragam. Sehingga perhitungan volume partikel menggunakan perhitungan volume bola, dimana rumus volume bola adalah sebagai berikut:

$$V_{\text{bola}} = \frac{4}{3} \pi r^3 \dots\dots\dots(3)$$

Untuk volume 1000 partikel, persamaan (3) menjadi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 V_{1000 \text{ partikel}} &= \frac{4}{3} \pi r^3 \times 1000 \\
 &= \frac{4}{3} \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^3 \times 1000 \\
 &= \frac{4}{3} \pi \times \frac{D^3}{8} \times 1000 \\
 V_{1000 \text{ partikel}} &= \frac{1}{6} \pi \times D^3 \times 1000 \dots\dots\dots(4) \\
 &= \frac{1}{6} \pi \times 0.000076^3 \times 1000 \\
 &= 2.29 \times 10^{-10} \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

Sedangkan untuk volume *chamber* digunakan perhitungan volume silinder. Karena pada eksperimen menggunakan pipa silinder. Dimana rumus untuk volume silinder adalah sebagai berikut:

$$V_{\text{silinder}} = \pi \times r^2 \times t \dots\dots\dots(5)$$

Dimana untuk kondisi *chamber*, r adalah ½ dari lebar *chamber*, dan t adalah panjang *chamber*.

$$V_{\text{chamber}} = \pi \times 12.5^2 \times 100 \\ = 49062.5 \text{ mm}^3$$

Sehingga *Volume Fraction* setiap ukuran Partikel adalah :

$$\text{Volume Fraction} = \frac{\text{Volume 1000 partikel}}{\text{Volume Chamber}}$$

Tabel A.2 %Fraksi Tiap Ukuran Partikel

Ukuran Partikel (mm)	Volume 1000 partikel (mm ³)	<i>Volume Fraction</i>	% Fraksi
7.6×10^{-5}	2.0×10^{-10}	5.0×10^{-15}	5.0×10^{-13}
5.0×10^{-4}	6.5×10^{-8}	1.3×10^{-12}	1.3×10^{-10}
1.0×10^{-3}	5.2×10^{-7}	1.1×10^{-11}	1.3×10^{-9}
2.0×10^{-3}	4.2×10^{-6}	8.5×10^{-11}	8.5×10^{-9}
3.0×10^{-3}	1.4×10^{-5}	2.9×10^{-10}	2.9×10^{-8}

A.3. Jumlah Maksimum Partikel Dapat Terdeposisi dalam *Pore*.

Pada ukuran *pore* tertentu terdapat jumlah partikel terbanyak yang dapat terdeposisi. Dimana dihitung melalui volume *pore* dibagi dengan volume partikel.

Diketahui :

Diameter *pore* (d) : 0.0055 mm
Kedalaman *pore* (t) : 0.13 mm

$$\text{Volume Pore} = \phi \times r^2 \times t \\ = 3.14 \times \left(\frac{0.0055}{2} \right)^2 \times 0.13 \\ = 0.00000309 \text{ mm}^3$$

Tabel A.3 Jumlah Partikel Terdeposisi Maksimum

Ukuran Partikel (mm)	Volume partikel (mm ³)	Volume Pore (mm ³)	Jumlah Partikel Maksimum
7.6×10^{-5}	2×10^{-13}	3.09×10^{-6}	15450000
5.0×10^{-4}	6.54×10^{-11}	3.09×10^{-6}	47247
1.0×10^{-3}	5.23×10^{-10}	3.09×10^{-6}	5904
2.0×10^{-3}	4.18×10^{-9}	3.09×10^{-6}	738
3.0×10^{-3}	1.4×10^{-8}	3.09×10^{-6}	218

A.4. Ukuran Partikel Optimum yang Dapat Terdeposisi.

Ukuran partikel optimum yang dapat terdeposisi diartikan sebagai jumlah partikel yang terdeposisi pada setiap kondisi fluida dimana belum terjadi penurunan yang signifikan terhadap jumlah partikel terdeposisi di setiap ukuran partikel yang berbeda.

Untuk kondisi fluida laminar, sampel N_{Re} yang diambil adalah dengan N_{Re} 1500.

Tabel A.4 Jumlah Partikel Terdeposisi untuk N_{Re} 1500

Ukuran Partikel (mm)	Jumlah Partikel Terdeposisi (#)
7.6×10^{-5}	260
5.0×10^{-4}	253
1.0×10^{-3}	241
2.0×10^{-3}	221
3.0×10^{-3}	189

Pada tabel di atas dapat dilihat keseluruhan ukuran partikel masih optimum atau belum terdapat penurunan yang signifikan sehingga persentase ukuran partikel per ukuran *pore* adalah :

$$= \frac{0.003}{0.0055} \times 100 \% = 54 \%$$

Untuk kondisi fluida transisi, sampel N_{Re} yang diambil adalah dengan N_{Re} 3500.

Tabel A.5 Jumlah Partikel Terdeposisi untuk N_{Re} 3500

Ukuran Partikel (mm)	Jumlah Partikel Terdeposisi (#)
7.6×10^{-5}	335
5.0×10^{-4}	325
1.0×10^{-3}	325
2.0×10^{-3}	212
3.0×10^{-3}	44

Pada tabel diatas dapat dilihat ukuran partikel optimum pada 0.002 mm sehingga persentase ukuran partikel per ukuran *pore* adalah

$$= \frac{0.002}{0.0055} \times 100 \% = 36 \%$$

Untuk kondisi fluida turbulen, sampel N_{Re} yang diambil adalah dengan N_{Re} 7500.

Tabel A.6 Jumlah Partikel Terdeposisi untuk N_{Re} 7500

Ukuran Partikel (mm)	Jumlah Partikel Terdeposisi (#)
7.6×10^{-5}	417
5.0×10^{-4}	408
1.0×10^{-3}	397
2.0×10^{-3}	49
3.0×10^{-3}	30

Pada tabel diatas dapat dilihat ukuran partikel optimum pada 0.001 mm sehingga persentase ukuran partikel per ukuran *pore* adalah

$$= \frac{0.001}{0.0055} \times 100 \% = 18 \%$$

A.5. *Surface Charged Density* pada Setiap Ukuran Partikel.

Pada perhitungan *charge density* diketahui data sebagai berikut :

1. Ukuran Partikel = 0.000000076 m
2. Charged Partikel = 3×10^{-16} C

$$\begin{aligned}\text{Luas Area} &= 4 \times \pi \times r^2 \\ &= 4 \times 3.14 \times 0.000000076 \text{ m} \\ &= 1.81 \times 10^{-14}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Charge Density} &= \frac{A}{Q} \\ &= \frac{1.81 \times 10^{-14}}{3 \times 10^{-16} \text{ C}} \\ &= 2.095 \text{ C/m}^2\end{aligned}$$

Tabel A.7 *Surface Charged Density* untuk Tiap Ukuran

Ukuran Partikel (m)	<i>Surface Charged Density</i> (C/m ²)
7.6×10^{-8}	2.095
5.0×10^{-7}	0.048
1.0×10^{-6}	0.012
2.0×10^{-6}	0.003
3.0×10^{-6}	0.001

UDF FOR ELECTRIC FORCE

```
#include "udf.h"
#define Q 3.8e-14 /* particle electric charge C*/
#define VM 80000 /* magnetic field strength V/M */
#define TSTART 1e-10 /* field applied at t = tstart S*/
#define WALL_ID_6 -3.8e-14 /* charged at pore */

/* Calculate magnetic force on charged particle. Magnetic */
/* force is particle charge times cross product of particle */
/* velocity with magnetic field:  $F_x = q*b_z*V_y$ ,  $F_y = -q*b_z*V_x$  */

DEFINE_DPM_BODY_FORCE(particle_body_force, p, i)
{
    real bforce;
    if(P_TIME(p)>=TSTART)
    {
        if(i==0) bforce=Q*((-0.0487*(P_POS(p)[0]))+6.4141)*10000)*
P_VEL(p)[0];
        else if(i==1) bforce=-Q*((-0.0487*(P_POS(p)[1]))+6.4141)*
10000)*P_VEL(p)[1];
    }
    else
        bforce=0.0;
    /* an acceleration should be returned */
    return (bforce/P_MASS(p));
}
```



Halaman ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Besra, L., Uchikoshi, T., Suzuki, S., dan Sakka, Y. 2008. "Bubble-free aqueous electrophoretic deposition (EPD) by pulse-potential application". *Journal of the American Ceramic Society*, 91, 3154-3159.
- Bogart, T.E., Dey, S., Lew, K. K., Mohnet, S. E., dan Redwing, J. M. 2005. "Diameter-controlled synthesis of silicon nanowires using nanoporous alumina membranes". *Advanced Materials*, 17, 114-117.
- Brach, R. dan Dunn, P. 1992. "A mathematical model of the impact and adhesion of microspheres". *Aerosol Science and Technology*, 16, 51-64.
- Dehbi, A. 2008. "A CFD model for particle dispersion in turbulent boundary layer flows". *Nuclear Engineering*, 238, 707-715.
- Friedlander, S.K. dan Johnstone, H.F. 1957. "Deposition of Suspended Particles from Turbulent Gas Streams". *Industry of Chemical Engineering*, 49, 1151-1157.
- Guha, A. 2008. "Transport and deposition of particles in turbulent and laminar flow". *Fluid Mechanical*, 40, 311-41.
- Haber, S. 1996. "Deep electrophoretic penetration and deposition of ceramic particles inside impermeable porous substrates". *Journal of Colloid and Interface Science*, 179, 380-390.
- Hereidal, M. L. 2010. *Particle Dynamics in Monolithic Catalyst*. Ph. D Thesis Technical University of Denmark, Department of Chemical and Biochemical Engineering: Tidak Diterbitkan
- Hinds, W. C. 1999. *Aerosol Technology. Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles 2nd edition*. New York: John Wiley & Sons.
- Ishikawa, Y. dan Matsumoto, Y. 2001. "Elektrodeposition of TiO₂ photocatalyst into nano-pores of hard alumite". *Electrochimica Acta*, 46, 2819-2824.
- Jani, A.M.M., Losic, D., dan Voelcker, N. H. 2013. "Nanoporous anodic aluminium oxide; Advances in surface engineering and

- emerging applications". *Progress in Materials Science*, 58, 636-704.
- Johansson, E. M. 2010. *Controlling the Pore Size and Morphology of Mesoporous Silica*. Thesis Doktor Linkoping University Swedia Department of Physics, Chemistry, and Biology: Tidak Diterbitkan.
- Kamada, K., Tokotumi, M., Enomoto, N., dan Hojo, J. 2005. "Incorporation of oxide nanoparticles into barrier-type alumina film via anodic oxidation combined with electrophoretic deposition". *Journal of Materials Chemistry*, 15, 3388-3394.
- Kladas, D. D. 1993. *Turbine Cascade Optimization Against Particle Deposition*. Ph. D. Thesis University of Patras Department of Mechanical Engineering.
- Kusdianto, K. 2014. *The Role of Chemical and Physical Properties of Substrate in the Deposition of Particles*. Thesis Doktor Tokyo University of Agriculture and Technology (TUAT) School of Bio-Applications and Systems Engineering: Tidak Diterbitkan.
- Kusdianto, K., Naim, M. N., Sasaki, K., dan Lenggoro, I. W. 2014. "Immobilization of colloidal particles into sub-100nm porous structures by electrophoretic method in aqueous media". *Colloid and Surface: A Physicochemical and Engineering*, 459, 142-150.
- Kusdianto, K., Gen, M., Tsukada, M., dan Lenggoro, I. W. 2014. "Insertion of presynthesized particles in the pores of honeycomb structure by an aerosol process". *Journal of the Society of Powder Technology Japan*, 51, 759-764.
- Kyotani, T. 2002. "Chemical modification of carbon-coated anodic alumina films and their application to membrane filter". *Journal of Membrane Science*, 196, 231-239.
- Losic, D., Cole, M. A., Dollmann, B., Vasilev, K., dan Griesser, H. J. 2008. "Surface modification of nanoporous alumina membranes by plasma polymerization". *Nanotechnology*, 19, 245-254.

- Martinson, A.B.F., Elam, J. W., Hupp, J. T., dan Pellin, M. J. 2007. "ZnO nanotube based dye-sensitized solar cells". *Nano Letters*, 7, 2183-2187.
- Masuda, H., Higashitami, K., dan Yoshida, H. 2006. *Powder Technology Handbook Third Edition*. New York: Taylor & Francis Group.
- Matsumoto, Y., Ishikawa, Y., dan Nishida, M. 2000. "A new electrochemical method to prepare mesoporous titanium (IV) oxide photocatalyst fixed on alumite substrate". *Journal of Physical Chemistry*, 104, 4204-4209.
- Menguturk, M dan Sverdrup, E. F. 1982. "A theory for fine particle deposition in two-dimensional boundary layer flows and application to gas turbines". *Journal of Engineering for Power*, 104, 68-76.
- Murakami, S., Kato, S., Nagano, S., dan Tanaka, S. 1992. "Diffusion characteristics of airborne particles with gravitational settling in a convention-dominant indoor flow field". *Ashrae Transactions*, 98, 82-97.
- Naim, M.N., Iijima, M., Sasaki, K., Kuwata, M., Kamiya, H., dan Lenggoro, I. W. 2010. "Electrical-driven disaggregation of the two-dimensional assembly of colloidal polymer particles under pulse DC charging". *Advanced Powder Technology*, 21, 534-541.
- Ortega-Cervantez, G., Rueda-Morales, G., dan Ortiz-Lopez, J. 2009. "Cold-wall CVD carbon nanotube synthesis on porous alumina substrates". *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 20, 403-407.
- Shankara, P. 2010. *CFD Simulation and Analysis of Particulate Deposition on Gas Turbine Vanes*. Thesis Magister The Ohio State University Department Aeronautical and Astronautical Engineering: Tidak Diterbitkan
- Soltani, M dan Ahmadi, G. 1994. "On particle adhesion and removal mechanisms in turbulent flows". *Journal Adhesion Science Technologi*, 8, 763-785.

- Uchikoshi, T., Ozawa, K., Hatton, B. D., Sakka, Y., dan Dense. 2001. "Bubble-free ceramic deposits from aqueous suspensions by electrophoretic deposition". *Journal of Materials Research*, 16, 321-324.
- Wong-ek, K. Et al. 2010. "Silver nanoparticles deposited on anodic aluminium oxide template using magnetron sputtering for surface-enhanced Raman scattering substrate". *Thin Solid Films*, 518, 7128.
- Wood, N. B. 1981. "A Simple Method for the Calculation of Turbulent Deposition to Smooth and Rough Surfaces". *Journal of Aerosol Science*, 12, 275-290.
- Yao, Qiang., Zhengwei Long., Qiang Dong, Shuiqing Li. 2009. "Three Dimensional Simulation of Electric Field and Space Charge in the Advanced Hybrid Particulate Collector". *Journal Of Electrostatics*, 835-843.
- Yau, K. K. dan Young, J. B. 1987. "The deposition of fog droplets on steam turbine blades by turbulent diffusion, Transactions of ASME". *Journal of Turbomachinery*, 109, 429-435.
- Yook, S. J., Asbach, C., dan Ahn, K. H. 2010. "Particle deposition velocity onto a face-up flat surface in a laminar parallel flow considering Brownian diffusion and gravitational settling". *Journal of Aerosol Science*, 41, 911-920.

Biodata Penulis



I Gede Wahyudi Mahendra Putra lahir di Denpasar, 14 Februari 1993. Anak dari Bapak Ir. Nyoman Gede Baliarta, MT dan Ibu Ir. Nyoman Kusumayani ini telah menempuh pendidikan di SD Negeri 6 Ubung Tahun 1999-2005, melanjutkan di SMP Negeri 10 Denpasar Tahun 2005-2008, dan melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 4 Denpasar Tahun 2008-2011. Penulis melanjutkan studi S1 di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Jurusan Teknik Kimia pada Tahun 2011-2015. Penulis pernah melaksanakan kerja praktek di PT. Pupuk Kalimantan Timur periode Juli-September 2014. Penulis juga aktif sebagai Ketua Study Excursion K51. Di akhir masa studi, penulis mengerjakan Tugas Akhir di Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran bersama patnernya Rosmalia Andini di bawah bimbingan Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng dan Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng. Penulis berhasil menyelesaikan tugas pra-Desain Pabrik Kimia dengan judul “Pabrik Gula Kristal Putih” dan Skripsi yang berjudul “Simulasi Numerik Deposisi *Charged Aerosol Particle* pada *Porous Structure*”. Saya ucapkan terima kasih terutama untuk partner saya Rosmalia Andini, teman-teman Lab Mixing, Ibu dr. Laksmi Duarsa, Sp.KK, Bapak Prof. Gede Wibawa dan keluarga, serta kedua orang tua saya atas segala dukungan dan bantuannya selama ini.

DATA PRIBADI

Nama	: I Gede Wahyudi M.P
Alamat	: Purimas Gianyar C5/5, SBY
No. Telepon	: 085239175555
Email	: gdwahyudi_its@yahoo.com

Riwayat Hidup Penulis



Rosmalia Andini

Lahir di Kota Jakarta pada tanggal 28 Desember 1993. Merupakan putri bapak Swesly dan ibu Nurfaidah yang telah menempuh pendidikan TK Muara Warta (1998-1999). Penulis melanjutkan pendidikan di SD Negeri 05 Pagi, Jakarta tahun 1999-2005, melanjutkan di SMP Negeri 109, Jakarta tahun 2005-2008, dan melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 8, Jakarta tahun 2008-2011. Penulis melanjutkan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya Jurusan Teknik Kimia pada tahun 2011-2015. Penulis pernah melaksanakan kerja praktek di PT. PERTAMINA RU VI Balongan periode Juli 2014. Di akhir masa studi, penulis mengerjakan Tugas Akhir di Laboratorium Mekanika Fluida dan Pencampuran bersama patner I Gede Wahyudi M. P. di bawah bimbingan Prof. Dr. Ir. Sugeng Winardi, M.Eng dan Dr. Kusdianto, S.T., M.Sc.Eng. Penulis berhasil menyelesaikan tugas pra-Desain Pabrik Kimia dengan judul “Pabrik Gula Kristal Putih” dan Skripsi yang berjudul “Simulasi Numerik Deposisi *Charged Aerosol Particle* pada *Porous Structure*”.

DATA PRIBADI

Nama	: Rosmalia Andini
Alamat	: Taman Permata Cikunir, B2 No. 4, Bekasi Selatan
No. Telepon	: 0856 9229 5381
Email	: rosmalia.andini@gmail.com